

Analýza vplyvu geometrie lopatiek na výkonové charakteristiky modelu malej veternej elektrárne

Bc. Martin Bezák¹, Ing. Marek Pípa, PhD.²

¹ Experimentálne pracovisko LVN FEI STU

² Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, LVN FEI STU

marek.pipa@stuba.sk

Abstrakt – Tento odborný príspevok sa zaoberá experimentálnou analýzou vplyvu geometrie lopatiek na prevádzkové charakteristiky modelu malej veternej elektrárne. Hlavným cieľom práce je kvantifikovať vzťah medzi tvarom aerodynamického profilu a schopnosťou rotora efektívne transformovať kinetickú energiu vetra na elektrickú energiu.

Primárnym cieľom práce je identifikácia rozdielov a trendov jednotlivých meraných charakteristík skúmaných profilov. Práca priamo nadväzuje na predchádzajúcu autorovu bakalársku prácu (Experimentálny edukačný funkčný model malej veternej elektrárne) a rozširuje ju o ďalšie experimentálne meranie. Súčasťou experimentu je súbor meraní prevádzkových parametrov elektrárne pri použití rôznych geometrií lopatiek. Získané dáta z laboratórneho modelu sú následne spracované do grafickej podoby a na záver validované vzájomnou komparáciou.

1 Energetická bilancia a teoretický výkon veterných elektrární

Výkon veternej turbíny je priamo závislý od kinetickej energie vzdušnej masy pretekajúcej plochou rotora. Proces transformácie tejto energie je však limitovaný nielen technickou konštrukciou, ale aj fyzikálnymi zákonmi aerodynamiky. [1]

Teoretický výkon veterného prúdu (P), ktorý preteká plochou (S) kolmo na smer prúdenia, je vo všeobecnosti definovaný vzťahom:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * S * v^3 * \eta \quad [W] \quad (1)$$

kde :

ρ [kg/m³] je hustota vzduchu (štandardne 1,225kg/m³ pri 15°C a tlaku 1113hPa)

S [m²] je plocha opísaná rotorom (pre horizontálnu os)

v [m/s] je rýchlosť nabiehajúceho prúdu vzduchu na rotor

η [-] reprezentuje Betzovu účinnosť (maximálny teoretický dosiahnuteľný výkon. [1])

Z rovnice vyplýva, že výkon rastie s tretou mocninou rýchlosti vetra. To znamená, že aj malá nepresnosť v geometrii lopatky, ktorá zvýši rozbehovú rýchlosť, má drastický dopad na

celkový energetický zisk pri nízkych rýchlostiach. Ak vychádzame zo základného vzťahu pre teoretický výkon vetra, vidíme, že plocha vystupuje ako lineárny multiplikátor, pričom v prípade horizontálnych osí rotácie je definovaná kruhovým priemetom lopatiek do roviny kolmej na smer prúdenia vzduchu. Matematicky je vyjadrená ako:

$$S = \pi * r^2 \quad [m^2] \quad (2)$$

kde polomer (r) zodpovedá dĺžke lopatky zväčšenej o polomer náboja, čo znamená, že aj relatívne malé konštrukčné zmeny v dĺžke lopatiek vedú ku kvadratickému nárastu účinnej (aktívnej) plochy a tým k výraznému ovplyvneniu celkového energetického zisku. [1] [9]

Pri detailnejšom skúmaní geometrie rotora malej veternej elektrárne už nevnímame plochu len ako abstraktný geometrický kruh, ale zameriavame sa na interakciu medzi prúdiacim vzduchom a reálnou plochou samotných lopatiek. Do popredia vystupuje parameter známy ako koeficient zaplnenia rotora, označovaný ako „ σ “ (z odbornej angličtiny „solidity“), ktorý vyjadruje pomer medzi celkovou plochou, ktorú fyzicky zaberajú lopatky, a celkovou opísanou plochou rotora. Pri malých veterných turbínach je tento parameter kritický, pretože priamo určuje charakteristiku krútiaceho momentu a optimálnu prevádzkovú rýchlosť zariadenia. Ak v rámci návrhu zvolíme vysoké zaplnenie, čo v praxi znamená použitie väčšieho počtu lopatiek alebo profilov s výrazne širšou tetivou, model bude schopný generovať vysoký krútiaci moment už pri relatívne nízkych rýchlostiach vetra. To je pri malých systémoch často kľúčové pre ich úspešný rozbeh v turbulentnom prostredí, avšak za cenu zvýšeného aerodynamického odporu, zvýšenej celkovej hmotnosti, a k zhoršeným vibráciám sústrojenstva. [1] [3] [9]

Betzova účinnosť je teoretická maximálna účinnosť, ktorú môže dosiahnuť konvertor energie, ako napríklad veterná turbína pri premene kinetickej energie vetra na mechanickú energiu. Tento pojem je pomenovaný po Albertovi Betzovi, ktorý dokázal, že existuje hodnota maximálnej možnej účinnosti konverzie vetra. Označuje sa tiež ako **Betzov limit**. Maximálny výkon, ktorý možno získať z vetra, sa vypočíta pomocou princípu Bernoulliho rovnice, ktorá vyjadruje zákon zachovania energie pre tekutiny a pomáha nám určiť potenciál využitia veternej energie. [2] [3]

Maximálny teoretický výkon pre predmetnú malú veternú elektrárňu (ďalej iba MVTE) je vypočítaný v časti 2.2.

2 Analýza skúmaných profilov a veličín



Obr. 1: Porovnávané profily listov

1] Profil č.1 (prvý zľava)

Geometria má tenký podlhovastý tvar s prvkami profilu NACA4421. Ide o takmer symetrický klinový profil s plynule zaoblenými hranami, mierne väčšou hrúbkou. Ide o veľmi populárny profil používaný vo veľkých veterných elektrárňach, vhodný najmä tam, kde je potrebný veľmi malý odpor prúdenia a nižšia hmotnosť. Spomedzi všetkých porovnávaných profilov má tento najmenšiu aktívnu plochu. [7]

2] Profil č.2 (druhý zľava)

Geometria má charakter tzv. trapézového tvaru, ktorý sa smerom nadol postupne rozširuje a na spodnej časti prechádza do malej upevňovacej stopky. Profil je relatívne tenší a mierne zakrivený smerom nahor. Vonkajšie hrany sú plynulo zaoblené. Typicky využívaný profil medzi komerčne vyrábanými MVTE, niekedy aj s trojhranným úplne plochým vyhotovením. V praxi sa však stretávame aj so 4 a viaclistovými konfiguráciami.

3] Profil č.3 (druhý sprava)

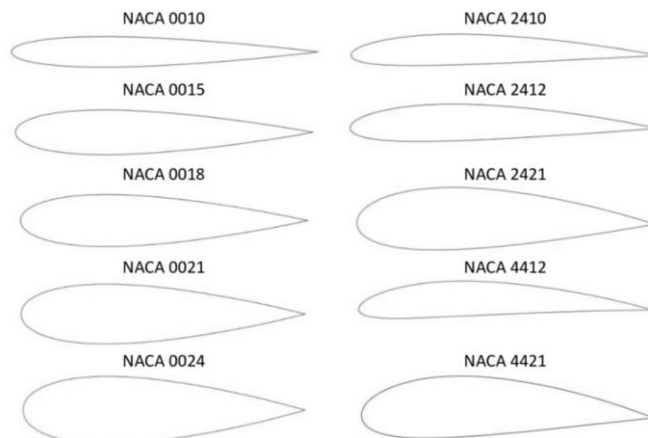
Tvar profilu je širší a výraznejšie rozšírený v strednej a hornej časti, pričom sa smerom nadol postupne zužuje do úzkej stopky. Geometria je inšpirovaná prvkami profilu NACA0010. Celková plocha profilu je pomerne veľká a má najvyššiu hmotnosť zo všetkých porovnávaných. Hrany sú plynulo zaoblené a oblé, čím sa vytvára hladký a súvislý prechod smerom von. Dizajn tohto profilu bol zamýšľaný tak, aby pokryl čo najväčšiu plochu a bol taktiež inšpirovaný MVTE s tzv. „westernovým“ dizajnom (obr. 4), kde sa dbal dôraz na čo najvyššiu aktívnu plochu a n-listovú konfiguráciu.

4] Profil č.4 (prvý sprava)

Profil má celkovo tenší a pomerne rovnomerný tvar, vychádzajúci najmä z NACA4412 profilu. Spodná časť je zakončená rozšírenou základňou určenou na uchytenie. Hrany sú jemne zaoblené, čo zjemňuje prechody medzi jednotlivými plochami. Celkový tvar (podobne ako pri profile č. 3) zaberá väčšiu plochu, pričom pôsobí kompaktné a robustne.

NACA profil

NACA (National Advisory Committee for Aeronautic) profily sú matematicky definované tvary priečných rezov lopatiek, ktoré tvoria geometrický základ Kaplanových a veterných turbín. Technicky určujú priehyb strednice a priebeh hrúbky profilu s cieľom maximalizovať hydraulický vztlak a minimalizovať odpor prúdenia. Ich presná definícia umožňuje optimalizovať rozloženie tlaku na lopatke, čím sa predchádza nežiaducim vplyvom a zvyšuje sa celková účinnosť turbíny pri rôznych prevádzkových podmienkach. [3] [4]



Obr. 2: Typy základných NACA profilov [4]



Obr. 3,4: Príklady použitia profilov 2 a 3 [5] [6]

Vzhľadom na aerodynamické a mechanické odlišnosti jednotlivých testovaných profilov listov rotora dochádza k situácii, kedy sledované elektrické a mechanické veličiny (ako sú napätie, prúd či generovaný výkon) nadobúdajú porovnateľné hodnoty pri rôznych rýchlostiach prúdenia vzduchu a rôznych uhloch nastavenia. Táto variabilita vstupných podmienok priamo znemožňuje objektívne porovnanie efektivity jednotlivých tvarov listov v ich základnom stave. Pre relevantné zhodnotenie energetického prínosu a aerodynamickej kvality jednotlivých variantov je preto nevyhnutné pristúpiť ku korekcii nameraných dát. Proces normalizácie bude spočívať v matematickom prepočte všetkých nameraných parametrov na jednotnú referenčnú rýchlosť vetra, ktorá bude slúžiť ako spoločná vzťažná hodnota. Tento metodický postup využíva fyzikálne zákony podobnosti a bezrozmernú charakteristiku rýchlobežnosti, vďaka čomu je možné zjednotiť výsledky meraní do porovnateľnej bázy pri zachovaní fyzikálnej vernosti. [7]

2.1 Prepočet parametrov rozličných profilov na referenčnú rýchlosť vetra

V aerodynamike a pri veterných turbínach sa na tento účel používajú zákony podobnosti (scaling laws). Budeme vychádzať z predpokladu, že pri zmene rýchlosti vetra sa zachováva tzv. rýchlobežnosť (λ) – teda pomer obvodovej rýchlosti listov k rýchlosti vetra. [1] [7] [9]

Ako referenčnú rýchlosť vetra zvolíme najvyššiu nameranú rýchlosť vetra daného profilu pri danom uhle natočenia. V tomto prípade profil č.1 pri 25 stupňoch. Vypočítame pomer medzi cieľovou (referenčnou) rýchlosťou a rýchlosťou, ktorú sme reálne namerali v tuneli (pri určitom uhle natočenia):

$$k = \frac{v_{\text{referenčné}}}{v_{\text{namerané}}} \quad (3)$$

Tento bezrozmerný koeficient (k) nám povie, „koľkokrát“ musíme hodnoty vynásobiť alebo vydeliť. [1]

Prepočet otáčok

Otáčky (n) rastú lineárne s rýchlosťou vetra. Ak predpokladáme konštantnú rýchlobežnosť:

$$n_{\text{ref}} = n_{\text{namerané}} * k \quad (4)$$

Príklad: Pri 4m/s bolo namerané 100ot/min. a referenčná rýchlosť bola 5m/s. Potom pre výsledné $k = 1,25$, vypočítané otáčky budú 125ot/min.

Prepočet napätia

Použitý generátor v experimentálnom modeli MVTE je typu krokový motor s permanentnými magnetmi. Pri bežných generátoroch takéhoto typu je napätie priamo úmerné otáčkam. Teda platí obdobný vzťah ako pri otáčkach:

$$U_{\text{ref}} = U_{\text{namerané}} * k \quad [V] \quad (5)$$

Prepočet prúdu a výkonu

V uvažovanom modeli MVTE je už spomínaný generátor s permanentnými magnetmi. V takomto stroji platí základný fyzikálny zákon: elektrický prúd (I) je priamo úmerný mechanickému krútiacemu momentu (M), ktorý na hriadeľ pôsobí. Zjednodušene povedané, aby generátor vytvoril väčší protitlak (moment) proti silnejšiemu vetru, musí ním tiecť proporcionálne väčší prúd. [1] [3]

Ak teda platí, že moment rastie kvadraticky s rýchlosťou vetra (v^2), a prúd kopíruje moment, potom logicky platí, že prúd rovnako rastie s v^2 .

Hoci použitie fixných odporových stupňov počas experimentu vnáša do merania charakteristiku podľa Ohmovho zákona, pre účely objektívneho porovnania aerodynamického potenciálu profilov využívame prepočet celkového výkonu s jeho prirodzenou kubickou závislosťou od rýchlosti prúdenia. [1]

Výkon je teda určený ako súčin napätia a prúdu:

$$P = U_{\text{nam}} * I_{\text{nam}} \quad [W] \quad (6)$$

Keďže napätie $U \sim k$ a $I \sim k^2$, výsledný výkon sa prepočítava s treťou mocninou:

$$P_{\text{ref}} = P_{\text{namerané}} * k^3 \quad [W] \quad (7)$$

Súhrn

Týmto spôsobom prepočtu sa eliminuje vplyv kolísania podmienok v meracom veternom tuneli a vytvorí sa jednotná dátová základňa pre určenie energeticky najefektívnejšieho geometrického riešenia rotora malej veternej elektrárne.

Táto úvaha a použitý výpočet predpokladá, že zvolený generátor má rovnakú účinnosť pri všetkých otáčkach, čo nie je úplne pravda (straty trením a teplom rastú so zvyšujúcimi sa otáčkami). Pre toto meranie sú však otáčky držané na relatívne nízkych hodnotách, ktoré nespôsobujú až tak výrazné zmeny v stratách trením alebo teplom. Tieto straty teda zanedbáme.

Tento prepočet bude potrebné zopakovať pre každý uhol natočenia zvlášť, keďže pri rôznych uhloch natočenia dosahovali profily rôzne rýchlosti. Pri každom nastavení porovnáваме v podstate aerodynamickú účinnosť tvarov pri tomto jednom konkrétnom nastavení. [1] [3] [7]

2.2 Maximálny teoreticky dosiahnuteľný výkon

Výpočet maximálneho teoreticky dosiahnuteľného výkonu:

$$P_{\text{teor}} = \frac{1}{2} * 1,1839 * \pi * 0,2^2 * 9^3 * 0,593 \quad (8)$$

$$P = 32,16W$$

Pre konštantnú rýchlosť vetra ($v = 9\text{m/s}$), polomer listu turbíny ($r = 20\text{cm}$), konštantnej hustoty vzduchu ($\rho = 1,1839\text{kg/m}^3$) a Betzovú účinnosť ($\eta = 0,593$).

2.3 Konštrukčné zmeny od pôvodného modelu

Experimentálny model bol pred meraním upravený a vylepšený o nové kvalitnejšie diely z pevnejších plastových materiálov (určených pre 3D tlač) ako PETG alebo ASA (namiesto pôvodných PLA). Ďalej bola mierne pozmenená konštrukcia prevodovky a celkové riešenie stabilizácie modelu v meracom tuneli. [10]

Integrácia spomínaných robustnejších komponentov a zvýšenie mechanickej stability systému so sebou priniesli prirodzený nárast pasívnych odporov a mierny odklon od teoreticky ideálneho stavu. Tieto modifikácie, zamerané na posilnenie konštrukčnej integrity modelu, viedli k zvýšeniu celkovej hmotnosti rotujúcich častí a k technickej úprave prevodov v mieste uloženia generátora, čo sa nevyhnutne prejavilo vo vyššom výskyte mechanických strát. Je však dôležité zdôrazniť, že primárnym cieľom tohto merania nie je dosiahnutie rekordnej účinnosti, ale objektívna komparácia aerodynamického vplyvu jednotlivých profilov lopatiek na výkonové charakteristiky. Prioritizácia stability a bezpečnosti pred čistým výkonom tak vytvára predvídateľnejšie experimentálne prostredie, ktoré je kľúčové pre presné zachytenie rozdielov v správaní meraných geometrií v celom rozsahu otáčok. [8]

3 Meranie prevádzkových charakteristík

Úvodná časť analýzy bude venovaná stanoveniu rozbehovej rýchlosti, ktorá definuje minimálny energetický potenciál prúdenia, potrebný na prekonanie mechanických odporov a zotrvačnosti rotora pri konkrétnom profile.

V ďalšej časti sa sleduje správanie elektrárne pomocou merania závislosti otáčok od miery zaťaženia, čo pomôže nájsť najvhodnejšie nastavenie pre každý tvar lopatiek.

Meranie napätia a prúdu pri viacerých odporových stupňoch slúži ako základ pre výpočet výkonu, celkovej účinnosti a vyhotovenie základnej záťažovej charakteristiky.

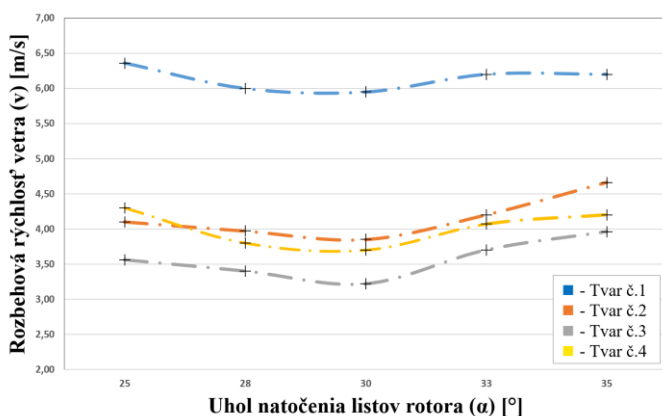
Dôležitou súčasťou experimentu sú aj testy nakrátko a naprázdno, ktoré odhalia vnútorné straty a vlastnosti generátora bez pripojenej záťaže.

Záverečné porovnanie všetkých profilov následne ukáže, ako presne tvar lopatiek ovplyvňuje výrobu energie a stabilitu otáčok. [7] [9]

3.1 Rozbehová rýchlosť

Metodika stanovenia rozbehovej rýchlosti vychádza z precízneho nastavenia prevádzkových parametrov, pričom sa pre konkrétny profil lopatiek najskôr zvolí fixný uhol natočenia. V našom prípade hľadáme najoptimálnejšiu rozbehovú rýchlosť, merací interval sa teda dá zúžiť na rozsah 25 – 35°. Počas experimentu sa rýchlosť prúdenia vzduchu v aerodynamickom tuneli plynule a pozvoľne zvyšuje až do momentu, kedy je zaznamenaný iniciálny pohyb rotora.

Za relevantný rozbeh sa v tomto kontexte považuje výhradne stav, pri ktorom rotor vykoná aspoň jednu celú otáčku okolo svojej osi, zatiaľ čo drobné kmity alebo čiastkové pohnutie listov sa do výsledkov nezapočítavajú. Celý proces sa systematicky opakuje pre súbor rôznych uhlov natočenia, pričom definitívna hodnota rozbehovej rýchlosti sa následne určuje ako aritmetický priemer všetkých získaných údajov. [1] [2] [9]

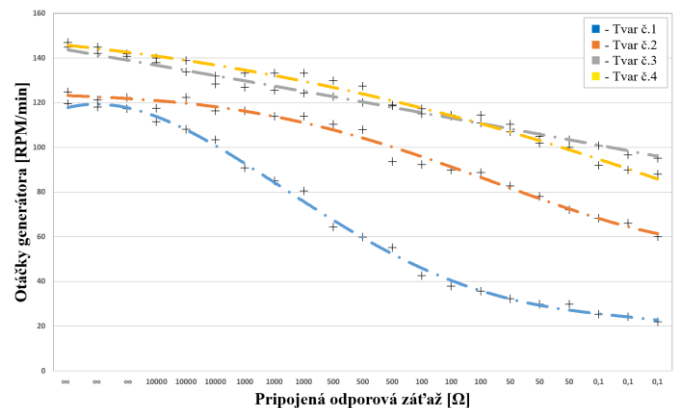


Obr. 5: Graf porovnania rozbehových rýchlostí

3.2 Závislosť otáčok od pripojenej záťaže

Táto experimentálna metodika spočíva v sledovaní odozvy otáčok na postupne zvyšovanú elektrickú záťaž pri zachovaní ustáleného prúdenia vzduchu v aerodynamickom tuneli. Na elimináciu chýb spôsobených prechodnými javmi a stabilitu meracieho reťazca vykonáva systém zápisu dát trikrát pre každý záťažový stupeň, čím sa zabezpečí vyššia presnosť výsledných hodnôt.

Východiskovým bodom pre každý profil je nastavenie takej rýchlosti vetra, pri ktorej generátor za prevodovkou dosiahne referenčnú hodnotu ~130 otáčok za minútu. Vzhľadom na odlišnú aerodynamickú účinnosť jednotlivých geometrií sa táto počiatočná rýchlosť prúdenia bude pri každom modeli líšiť. S cieľom zabezpečiť objektívnu porovnateľnosť sú namerané údaje následne normalizované na spoločnú referenčnú rýchlosť vetra pomocou výpočtových vzťahov definovaných v časti 2.1. Celý proces sa pre každý profil opakovane realizuje v niekoľkých sériách, čím sa minimalizuje neistota merania a zvyšuje sa štatistická významnosť získaných výkonových charakteristík. [2] [9]



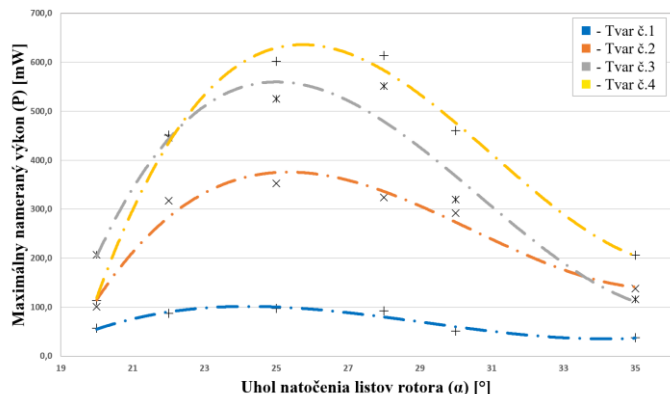
Obr. 6: Graf porovnania závislosti otáčok generátora od pripojenej záťaže (α = 25°)

3.3 Závislosť najvyššieho nameraného výkonu od uhla natočenia

Cieľom tejto fázy experimentu je kvantifikácia maximálneho elektrického výkonu, ktorý je generátor schopný dodať pri konkrétnom uhle natočenia pre rôzne geometrické konfigurácie lopatiek.

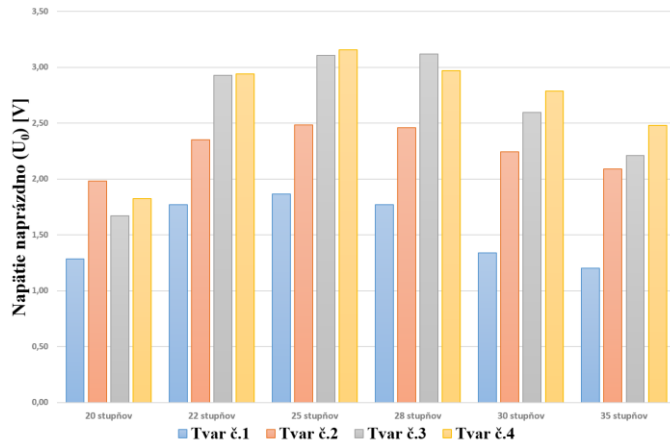
Výkon generátora sa získa nepriamo, t.j. výpočtom pomocou nameraného napätia a prúdu (hodnoty po prepočte na jednotnú rýchlosť vetra).

Pre dosiahnutie dostatočnej vzorky údajov a minimalizáciu meracích neistôt sa každý testovací cyklus realizuje v troch opakovaníach. Hoci čiastkové konštrukčné modifikácie na súčasnom prototypu spôsobujú pokles absolútnych hodnôt výstupného výkonu, očakáva sa, že charakteristický trend a poloha výkonového maxima zostanú v porovnaní s pôvodným modelom zachované. [2] [9]



Obr. 7: Graf porovnania závislosti maximálneho dodávaného výkonu do záťaže od uhla natočenia daného profilu

elektromagnetický brzdný moment. Hlavným cieľom tohto experimentu je presne určiť, ako rôzne geometrické profily lopatiek a ich konkrétne uhly natočenia ovplyvňujú primárnu schopnosť systému generovať napäťový potenciál ešte pred samotným vykonaním užitočnej elektrickej práce. [9]



Obr. 8: Graf porovnania závislosti napätia generátora naprázdno daných profilov od uhla natočenia

3.4 Účinnosť profilov

Charakteristika účinnosti v závislosti od uhla natočenia lopatiek v podstate kopíruje priebeh výkonovej krivky, od ktorej je táto veličina priamo odvodená. Vzhľadom na túto úzku koreláciu sa analýza sústreďuje na stanovenie maximálnych dosiahnutých hodnôt účinnosti pre jednotlivé profily. [9]

Nasledujúci prehľad uvádza špičkovú účinnosť meraných profilov, ktorá bola vypočítaná pre prevádzkový stav zodpovedajúci maximálnemu elektrickému výkonu dodávanému do odporovej záťaže:

1) $P_{MAX} = 97\text{mW}$

$$\eta_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{P_{TEOR}} * 100 = \frac{0,097}{32,16} * 100 = 0,30\% \quad (9)$$

2) $P_{MAX} = 352\text{mW}$

$$\eta_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{P_{TEOR}} * 100 = \frac{0,352}{32,16} * 100 = 1,09\% \quad (10)$$

3) $P_{MAX} = 551\text{mW}$

$$\eta_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{P_{TEOR}} * 100 = \frac{0,551}{32,16} * 100 = 1,71\% \quad (11)$$

4) $P_{MAX} = 614\text{mW}$

$$\eta_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{P_{TEOR}} * 100 = \frac{0,614}{32,16} * 100 = 1,91\% \quad (12)$$

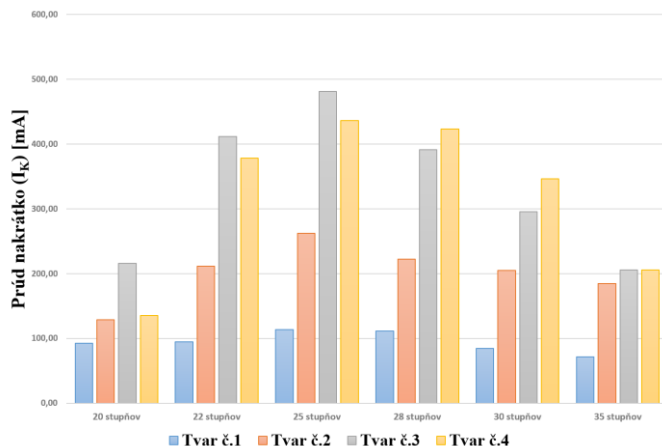
3.5 Závislosť napätia naprázdno daných profilov od uhla natočenia

Pri tomto meraní sledujeme maximálne indukované napätie na svorkách generátora v stave naprázdno, čo znamená, že elektrický obvod je rozpojený a rotor nie je brzdený pretekajúcim prúdom do záťaže. Absencia odoberaného prúdu spôsobuje, že na hriadeľ nepôsobí takmer žiadny

3.6 Závislosť prúdu nakrátko daných profilov od uhla natočenia

Meranie nakrátko predstavuje druhý limitný stav prevádzky, pri ktorom sú svorky generátora priamo spojené cez merací obvod. Tento špecifický režim simuluje podmienky absolútneho maximálneho zaťaženia systému a umožňuje sledovať najvyšší možný prúdový odber. S ním je bezprostredne spojený extrémne silný elektromagnetický brzdný moment vo vnútri stroja, ktorý pôsobí proti rotácii listov a spôsobí výraznú tendenciu k zastaveniu rotora.

Cieľom testu je analyzovať schopnosť jednotlivých profilov prekonávať tento mechanický odpor pri konkrétnych uhloch natočenia. Získané dáta určujú, ktorý profil má dostatočný krútiaci moment na udržanie stabilného chodu aj počas extrémneho skratového zaťaženia. [9]



Obr. 9: Graf porovnania závislosti prúdu generátora nakrátko daných profilov od uhla natočenia

4 Zhodnotenie nameraných výsledkov a porovnanie

Na základe vykonaných experimentov a následnej analýzy nameraných dát možno jednoznačne konštatovať, že zvolená geometria lopatiek má kritický vplyv na všetky sledované parametre modelu malej veternej elektrárne. Výsledky preukázali zásadné rozdiely v aerodynamickej účinnosti a prevádzkových vlastnostiach medzi štyrmi testovanými geometriami.

Analýza rozbehovej rýchlosti ukázala, že spomedzi testovaných vzoriek disponuje profil č. 3 najlepšou schopnosťou prekonať počiatočnú zotrvačnosť rotora a mechanické odpory sústavy. Jeho minimálna rozbehová rýchlosť sa pohybuje na úrovni ~3,2m/s pri uhle natočenia 28° až 30°. Profil č.4 zaostáva len minimálne a vykazuje takmer identické vlastnosti. Typ č.2 zaostáva za tvarmi 3 a 4 len mierne s rozbehovou rýchlosťou ~3,8m/s. Výrazným negatívnym extrémom je profil č.1, ktorý pre iniciačný pohyb vyžaduje rýchlosť prúdenia vzduchu presahujúcu hranicu 6m/s, čo ho v podmienkach nízkych rýchlostí vetra robí prakticky nepoužiteľným.

Pri sledovaní závislosti otáčok od veľkosti pripojenej záťaže bola pozorovaná vysoká aerodynamická stabilita tvarov 3 a 4. Tieto geometrie (podľa nameranej závislosti) dokážu efektívne udržiavať pracovné otáčky aj pri zvyšujúcom sa elektrickom odpore, pričom profil č.3 dokonca vykazuje unikátnu, takmer lineárnu charakteristiku poklesu otáčok. Naopak, tvar č.1 (čiastočne aj tvar č.2) vykazuje prudký prepád otáčok už pri nízkom zaťažení. Tento jav svedčí o nízkom dodávanom krútiacom momente a neschopnosti tohto profilu transformovať kinetickú energiu vetra na mechanickú prácu pod značnou záťažou.

Maximálny dosiahnutý výkon a účinnosť jednoznačne favorizujú profil č.4, ktorý pri uhle natočenia 25° dosiahol vrchol 614mW s účinnosťou 1,91%. Tieto špičkové výsledky potvrdzujú kvalitu použitého aerodynamického profilu NACA4412. Vzorka č.3 dosahuje veľmi porovnateľné hodnoty (551mW). Tvar č.2 dosiahol vrchol na 352mW, zatiaľ čo testovaný typ č.1 produkuje iba marginálnych 97mW pri minimálnej účinnosti 0,30%.

Nízke absolútne hodnoty celkovej účinnosti v porovnaní s komerčnými zariadeniami (15% – 35%) sú očakávaným dôsledkom konštrukčného riešenia experimentálneho modelu. Použitý krokový motor plní funkciu demonštračného generátora, no vzhľadom na vysoké vnútorné straty a primárne iné určenie nie je optimalizovaný na efektívnu výrobu energie. Napriek tomu relatívny, viac než šesťnásobný rozdiel v účinnosti medzi najlepším a najhorším profilom jasne demonštruje, že optimalizácia geometrie lopatiek je kľúčovým faktorom pre maximalizáciu účinnosti MVTE.

Testy limitných stavov (napätie naprázdno a prúd nakrátko) definitívne potvrdili prevahu geometrií 3 a 4. Profil č.4 pri uhle 25° generuje najvyššie indukované napätie presahujúce 3V. Tvar č.3 naopak dominuje v produkcii skratového prúdu, čo poukazuje na jeho schopnosť výborne odolávať silnému elektromagnetickému brzdnému momentu. Táto vlastnosť je pravdepodobne daná jeho väčšou plochou a vyššou zotrvačnou hmotnosťou, čo mu umožňuje udržať stabilitu aj v režimoch s extrémnym zaťažením.

5 Záver

Z komplexného zhodnotenia nameraných dát jednoznačne vyplynulo, že profily 3 a 4 sa javia ako najvhodnejšie zo všetkých sledovaných hľadísk, či už ide o rozbehovú rýchlosť, stabilitu otáčok alebo celkový generovaný výkon. Kľúčovým faktorom pre dosiahnutie ich vyššej účinnosti pri tomto laboratórnom modeli sa ukázala byť dostatočne veľká aktívna plocha profilu, ktorá dokáže efektívnejšie zachytávať kinetickú energiu vetra. Tieto mohutnejšie a širšie tvary sú tak vďaka svojej aerodynamickej stabilite a výraznejším rozmerom veľmi jednoducho uplatniteľné a vysoko efektívne primárne v segmente MVTE.

Úplne odlišná situácia však nastáva pri teoretickej zmene mierky na priemyselnú úroveň. Pri veľkých komerčných veterných turbínach nachádza svoj plný zmysel práve štíhly profil č.1, a to predovšetkým kvôli jeho podstatne nižšej hmotnosti a lepším mechanickým vlastnostiam. Masívne tvary s obrovskou plochou (podobné profilom 3 a 4) by pri násobne väčších rozmeroch predstavovali veľké prevádzkové a bezpečnostné riziko. Ich nadmerná hmotnosť by neúmerne zaťažovala ložiská a celú nosnú konštrukciu, pričom obrovský odpor vzduchu by mohol viesť k vzniku nebezpečných rezonančných vibrácií a k deštrukcii rotora. Tieto zistenia tak potvrdzujú dôležitý fakt, že ideálna geometria lopatiek nie je univerzálna, ale musí byť vždy striktné optimalizovaná pre konkrétnu veľkostnú kategóriu a účel veternej elektrárne.

Podakovanie

Tento článok bol financovaný EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu c. 09I04-03-V02-00033. Tento článok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-20-0157 pre projekt „Efektívne prepojenie energetických systémov miest pomocou pokročilých otvorených technológií“.

Literatúra

- [1] J. F. E. A. MANWELL, kniha *Wind Energy Explained* (s.34, s.91 – 105), vydanie r. 2009
- [2] BEZÁK M., bakalárska práca – *Experimentálny edukačný funkčný model veternej elektrárne*, Dostupné na CRZP.sk, r.2025
- [3] M. O. HANSEN, kniha *Aerodynamics of Wind Turbines 3rd edition* (s.7 – 15), vydanie r. 2015
- [4] Webová stránka – „Katalógy profilov NACA“, Dostupné na: https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database
- [5] Webová stránka (obrázok) – „iXBT blog“, Dostupné na: www.ixbt.com/live/topcompile/solar
- [6] Webová stránka (obrázok) – „alamy“, Dostupné na: www.alamy.com/a-western-wind-turbine-on-gray-sky
- [7] TONY BURTON, NICK JENKINS, DAVID SHARPE, ERVIN BOSSANYI, kniha *Wind Energy Handbook* (s.55 – 70, 465 – 480). 2nd ed. Chichester,“ vydanie r. 2011
- [8] H. CROME, kniha *Technika využití energie větru*, Ostrava: nakladatelství HEL, vydanie r. 2002.
- [9] ERICH HAU, kniha *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, vydanie r. 2013.
- [10] Webová stránka – „PRUSA material guide“, Dostupné na: <https://help.prusa3d.com/filament-material-guide>

Zborník vybraných prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti

Študentská vedecká a odborná činnosť
14. apríl 2026

Organizátor:

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Editori:

Peter Benko
Stanislav Sojak

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU.
Náklad 50 ks CD nosičov

ISBN 978-80-227-5591-7

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.3 | FM vysieláč Samuel Bukva | 78 |
| 2.4 | Inteligentná vizuálna kontrola vo výrobnom závode Matej Bašista, Oto Haffner | 88 |
| 2.5 | Využitie Siemens Robot Library na interoperabilné ovládanie kolaboratívneho robota UR3e Samuel Hacker, Oto Haffner | 94 |
| 2.6 | Rozpoznávanie 3D identifikátorov pre účely ovládania výrobnéj linky v rozšírenej realite Egor Shveygert, Erik Kučera | 100 |
| 2.7 | Rozpoznávanie 3D identifikátorov Denis Pudelka, Oto Haffner | 105 |
| 3 | Elektroenergetika, Jadrové a fyzikálne inžinierstvo | 111 |
| 3.1 | Analýza vplyvu geometrie lopatiek na výkonové charakteristiky modelu malej veternej elektrárne Martin Bezák, Marek Pípa | 112 |
| 3.2 | Validácia PV Sol modelu fotovoltaickej elektrárne v MatLabe Robert Irgel, Milan Perný | 118 |
| 3.3 | Porovnanie vybraných softvérových nástrojov pri návrhu fotovoltaických systémov Damián Dalibor Kusovský, Miroslava Farkas Smitková | 123 |
| 3.4 | Porovnanie presnosti katastrálnych máp a CLC pri vyhodnotení potenciálu agrovoltiky Illia Lazarenko, Matej Cenký, Milan Perný | 128 |
| 3.5 | Influence of Layer Thickness and Substrate Temperature on Superconducting Properties of NbTiN Thin Films Nad'a Pániková, Tomáš Ščepka, Marián Precner | 135 |
| 3.6 | Analýza vplyvu rastových podmienok na elektrické vlastnosti súčiastok na báze Ga ₂ O ₃ Zuzana Pospechová, Fridrich Egyenes, S. G. Vadlamudi, et al. | 141 |
| 3.7 | Analýza problematiky zariadení na uskladnenie elektriny a ich vplyvu na prevádzku a rozvoj distribučnej sústavy Radovan Šikuda, Miroslava Farkas Smitková, Jakub Zárecký, et al. | 147 |
| 3.8 | Bezpečnostné analýzy plynom chladeného rýchleho reaktora Adam Turcel, Jakub Lúley | 153 |
| 4 | Elektronika a fotonika | 158 |
| 4.1 | Optimisation of Annealing Temperature for Conductivity Enhancement in Polycrystalline β -Ga ₂ O ₃ Thin Films Grown on Quartz Using Liquid-Injection MOCVD Tadeáš Lukáč, Michal Sobota, Dagmar Gregušová, et al. | 159 |
| 4.2 | Investigation of anisotropy in β -Ga ₂ O ₃ thin films on sapphire substrates Marcel Petřík, Ondrej Pohorelec, Dagmar Gregušová, et al. | 164 |

Členovia programového a recenzného výboru

doc. Ing. Daniel Arbet, PhD
doc. Mgr. Daniela Chudá, PhD.
RNDr. Juraj Chlpík, PhD.
Ing. Marián Choma
doc. Ing. Aleš Chvála, PhD.
Ing. Martin Dekan, PhD.
doc. Ing. Martin Ernek, PhD.
doc. Mgr. Miroslava Farkas Smitková, PhD.
doc. Ing. Miroslav Halás, PhD.
doc. Ing. Mária Hypiusová, PhD.
doc. Ing. Peter Janiga, PhD.
Ing. Tomáš Janvars, PhD.
doc. Ing. Kvetoslava Kotuliaková, PhD.
doc. Ing. Jaroslav Kováč, PhD.
Ing. Soňa Kováčová, PhD.
doc. Ing. Ladislav Körösi, PhD.
doc. Ing. Erik Kučera, PhD.
Ing. Matej Matuš, PhD
Ing. Patrik Novák, PhD.
Ing. Vladislav Novák
Ing. Kristián Ondrejčka, PhD.
Ing. Milan Perný, PhD.
Ing. Štefan Počarovský, PhD.
prof. Ing. Rastislav Róka, PhD.
Ing. Dávid Szépvölgyi
Ing. Šimon Tibenský
Ing. Michal Tölgyessy, PhD.
Ing. Izabela Trepáčová
doc. Ing. Erik Vavrinský, PhD.
doc. Ing. Milan Vojvoda, PhD
prof. Ing. Pavol Zajac, PhD.
Ing. Filip Zúbek