

Ing. Jozef Zuščak

Autoreferát dizertačnej práce

NÁVRH VETERNEJ ELEKTRÁRNE PRE OSTROVNÝ SYSTÉM

na získanie akademického titulu
doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

v študijnom odbore

5.2.30 Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 10.07.2019

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Jozef Zuščak

Autoreferát dizertačnej práce

NÁVRH VETERNEJ ELEKTRÁRNE PRE OSTROVNÝ SYSTÉM

na získanie akademického titulu
doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

Miesto a dátum: Bratislava, 10.07.2019

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia.

Na: Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Jozef Zuščak**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

Školiteľ: **prof. Ing. František Janíček, PhD.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

Oponenti: **prof. Ing. Pavol Rafajdus, PhD.**
Elektrotechnická fakulta – KVES
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Dr.h.c., doc. Ing. Juraj Wagner, PhD.
MŠVVŠ SR
Stromová 1
813 30 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o hod..

Na Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, miestnosť: C-417

.....
dekan FEI
prof. Dr. Miloš Oravec

Obsah

Úvod.....	4
Ciele dizertačnej práce.....	5
1 Faktory ovplyvňujúce výkon veterných turbín	6
1.1 Sila vetra, plocha rotora	6
1.2 Veterné podmienky	7
1.3 Teplota a hustota vzduchu	8
1.4 Nadmorská výška.....	9
1.5 Výška veže veternej turbíny nad terénom.....	10
2 Výkonový činiteľ a maximálny výkon na turbíne	12
3 Výpočet výkonu na turbíne pomocou BEM teórie	15
4 Matematický model na orientačný výpočet výkonu zariadenia na výrobu elektriny	16
4.1 Výber lokality a Weibullovo rozloženie	16
4.2 Výpočet ročnej výroby elektrickej energie	17
5 Program na výpočet výkonu vlastnej veternej turbíny	20
5.1 Podprogram na výpočet hustoty vzduchu	20
5.2 Podprogram na výpočet rýchlosti vetra	20
5.3 Podprogram na výpočet koeficientu výkonu	21
6 Meranie a simulácia samo budeného indukčného generátora.....	23
6.1 Merania a simulácie indukčného generátora s odporovou záťažou	24
7 Vytvorenie programu na 3-D modelovanie lopatky veternej turbíny	25
8 Vytvorenie programu na výpočet parametrov 2-D leteckého profilu.....	26
Prínos práce a výsledky	28
Použitelnosť výsledkov a prínosy	28
Odporúčania pre ďalšiu prácu	29
Záver.....	29
Použitá literatúra.....	30
Publikácie autora.....	31

Úvod

V súčasnosti, kedy ľudstvo rieši problémy s globálnym otepľovaním a skutočnosť, že zásoby fosílnych palív budú za pár desaťročí vyčerpané sa reálne otvára možnosť širšieho využitia obnoviteľných zdrojov energie. V súčasnosti je väčšina veľkých výrobných zariadení využívajúcich OZE prepojená s elektrizačnou sústavou (on-grid) a výkon dodáva priamo do nej. Druhou, čo do vyrobenej energie menšou skupinou systémov obnoviteľných zdrojov energie, sú tzv. ostrovné systémy (off-grid), teda systémy nepripojené k elektrizačnej sústave. Za posledné obdobie vykazujú stabilný rast, ako v rozvojových, tak aj v rozvinutých krajinách a to najmä vďaka znižovaniu nákladov, zvyšovaniu účinnosti solárnych systémov, malých vodných elektrární a veterných turbín, znižovaniu nákladov a technologickým pokrokom na poli uskladnenia elektrickej energie a kontrolných systémov. Energetické systémy pracujúce v ostrovnej prevádzke sa môžu stať dôležitým trhom pre budúce zavádzanie obnoviteľných zdrojov energie.

V prvej časti práce sa oboznámime s historickým vývojom veterných turbín. V ďalšej časti práce budeme analyzovať faktory, ktoré majú vplyv na produkciu elektrickej energie. Tieto teoretické poznatky použijeme pri tvorbe matematického modelu na predbežný výpočet výkonu. V práci bude rozpracovaný aj matematický model na návrh vlastnej veternej turbíny a tiež simulačný model pripojeného generátora pracujúceho v ostrovnej prevádzke a jeho verifikácia meraním.

Ciele dizertačnej práce

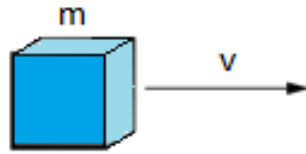
Dizertačná práca sa zaoberá problematikou veternej elektrárne pre použitie v ostrovných prevádzkach. Problematika zasahuje do komplexného systému, ktorý zahŕňa výber lokality pre umiestnenie veternej elektrárne, pohonné zariadenie (veternú turbínu), generátor a mnohé iné vplyvy, ktoré budú mať vplyv na produkciu elektrickej energie veternej elektrárne. Ten je zásadný a ovplyvňuje rentabilitu a opodstatnenie inštalácie takéhoto zariadenia, pretože svoje uplatnenie nachádzajú hlavne v lokalitách, kde je neekonomické stavať elektrickú prípojku, alebo v rozvojových krajinách, ktoré neprešli plošnou elektrifikáciou.

Tézy dizertačnej práce

1. Analyzujte vývoj veterných elektrární.
2. Princíp činnosti a faktory ovplyvňujúce veterné elektrárne.
3. Vytvorte matematický model na predbežný výpočet výkonu zariadenia na výrobu elektriny.

1 Faktory ovplyvňujúce výkon veterných turbín

1.1 Sila vetra, plocha rotora

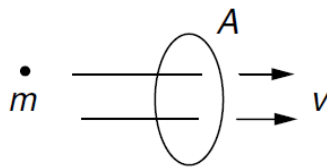


Obr. 1 Kinetická energia obsiahnutá v elemente vzduchu

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1)$$

kde E_k je kinetická energia (J), m – hmotnosť (kg), v – rýchlosť prúdenia vzduchu (m/s).

Z toho výkon vypočítame ako podiel energie za čas. Výkon vetra bude predstavovať hmotnosť vetra pohybujúceho sa rýchlosťou v cez plochu veternej turbíny A .



Obr. 2 Kinetická energia obsiahnutá v elemente vzduchu

$$P_w = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{t} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (2)$$

P_w je výkon vetra cez plochu A (W), E – energia (J), t – čas (s), $\dot{m}$ – hmotnostný prietok (kg/s), v – rýchlosť vzduchu (m/s).

Hmotnostný prietok $\dot{m}$, je hmotnosť vzduchu ktorý prejde jednotku plochy za jednotku času

Môžeme napísať:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (3)$$

kde ρ je hustota vzduchu (kg/m³), A – plocha (m²),

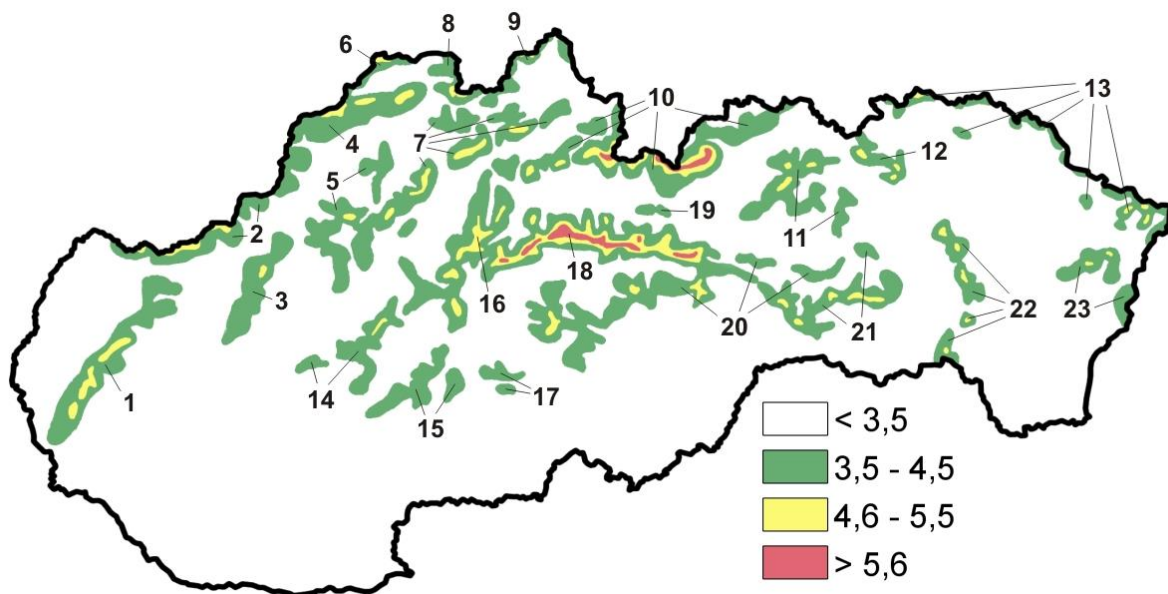
Kombináciou vzťahu (2) a vzťahu (3) dostávame dôležitú závislosť:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (4)$$

Zo vzťahu (4) je zrejmé, že výkon, ktorý vietor odovzdá turbíne bude najviac závislý na tretej mocnine rýchlosti vetra a na ploche, ktorú budú opisovať lopatky veternej turbíny.

1.2 Veterné podmienky

Veterné lokality sa určujú na základe dlhodobých meraní. U nás merania vykonáva predovšetkým Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ). Z týchto meraní sa za pomoci GIS softvéru (geografický informačný systém) dajú vykresliť oblasti s perspektívou využitia lokality na stavbu vetranej elektrárne. Výsledky ich meraní a výpočtov pre oblasť Slovenska sú znázornené na obr. 3. Z výsledkov je jasné, že Slovensko nemá najlepší potenciál na využívanie vetranej energie. Keby sme vylúčili lokality národných parkov a vtačných koridorov, kde je prísny zákaz stavania veľkých vetrných parkov, čísla by boli podstatne nižšie. Z toho vyplýva, že celkový potenciál je veľmi nízky. Tu sa otvára možnosť nasadenia malých vetrných turbín v off-grid prevádzke, na ktoré sa tieto obmedzenia nevzťahujú.



Obr. 3 Veterná mapa Slovenska [SHMÚ]

Môžeme povedať, že údaje potrebné na posúdenie lokality možno získať z rôznych zdrojov, vrátane:

- archívnych meteorologických údajov,
- meraním v danej lokalite,
- dát z numerického a fyzikálneho modelovania [1].

Tieto zdroje sa môžu navzájom kombinovať a za pomoci počítačových modelov sa dá relatívne presne interpolovať prúdenie na vybratom území.

1.3 Teplota a hustota vzduchu

V predošlej kapitole sme počítali s výkonom vetra pri hustote vzduchu pri 15 °C a pri atmosférickom tlaku 1 atmosféra = 101.325 kPa. Tieto čísla sa v praxi líšia, buď v dôsledku ročných období, ale čo je hlavné musíme s nimi uvažovať pri výbere lokality. Základom pre výpočet hustoty vzduchu je stavová rovnica ideálneho plynu:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (5)$$

kde p je tlak (Pa),

V - objem (m^3), n - látkové množstvo (mol), T - termodynamická teplota (K), R - molová plynová konštanta ($R = 8,2065 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$).

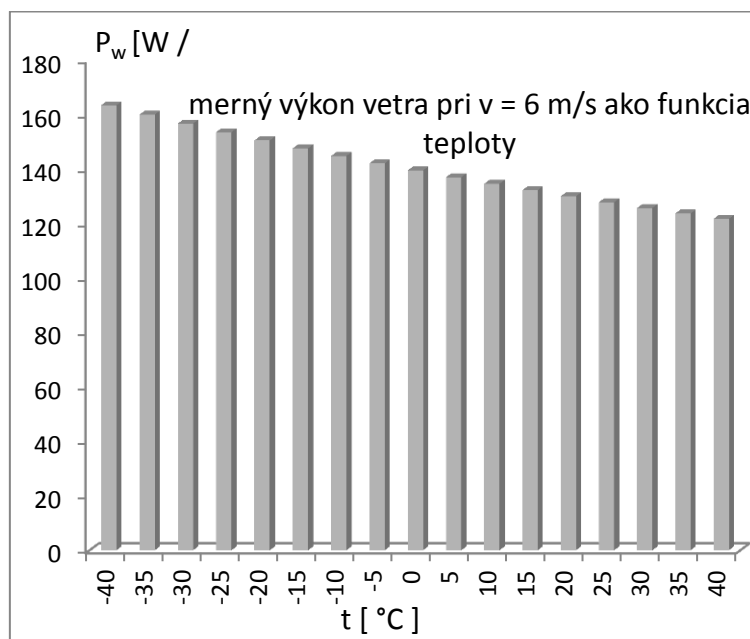
Keď si zavedieme pojem molová hmotnosť $M = m / n$ môžeme napísať rovnicu pre hustotu vzduchu nasledovne:

$$\rho = \frac{n \cdot M \cdot 10^{-3}}{V} \quad (6)$$

kde M je molová hmotnosť (g/mol), ρ - hustota (kg/m^3), V - objem (m^3), n - látkové množstvo (mol).

Po dosadení do stavovej rovnice ideálneho plynu dostávame tvar :

$$\rho = \frac{p \cdot M \cdot 10^{-3}}{R \cdot T} \quad (7)$$

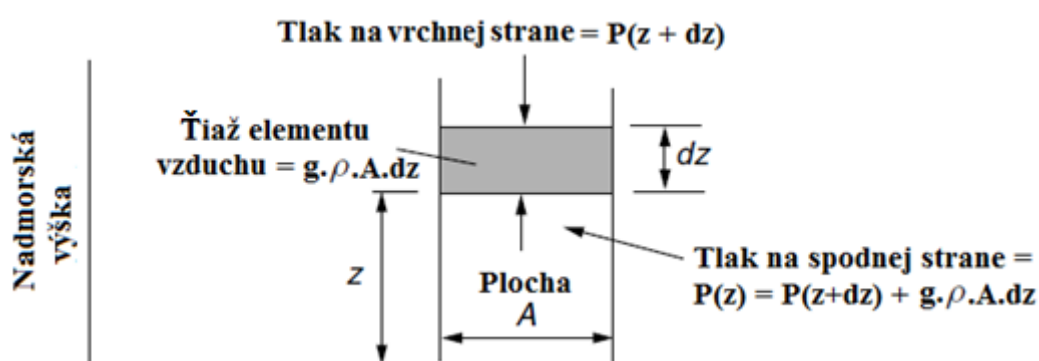


Obr. 4 Merný výkon vetra v závislosti na teplote vzduchu

Na obr. 4 je zachytená zmena výkonu vetra pri zmene hustoty vzduchu, ktorá bola zapríčinená zmenou teploty.

1.4 Nadmorská výška

Tlak vzduchu, ako sme si vyjadrili v predošlom texte nezávisí len od teploty, ale aj od nadmorskej výšky. Vo veľkých výškach je vzduch redší, čo znamená nižší počet molekúl vzduchu dopadajúcich na lopatku. To znamená menšiu kinetickú energiu, tým pádom menší výkon vetra. Na druhej strane však v takýchto výškach je prúdenie vzduchu viac laminárne a tým pádom má vyššiu rýchlosť. V nasledujúcom texte si popíšeme vplyv nadmorskej výšky na hustotu vzduchu a tým pádom aj na výkon turbíny. Pretože pri návrhu zdroja pre ostrovné prevádzky musíme rátať aj s týmto faktorom. Často sa stretávame (hlavne v rozvojových krajinách) s tým, že oblasť je bez dodávky elektrickej energie pretože sa nachádza v ťažko prístupnom horskom teréne. Navyše je oblasť riedko obývaná takže dobudovávať elektrizačnú sústavu do oblasti by bolo ekonomicky neefektívne.



Obr. 5 Tlak pôsobiaci na element vzduchu [2]

Obr. 5 zobrazuje tlak pôsobiaci na element vzduchu, kde g je gravitačné zrýchlenie (m/s^2), ρ - hustota vzduchu (kg/m^3), p - tlak vzduchu (Pa), z - výška (m), A - plocha (m^2). Znázorňuje, že čím väčší stĺpec vzduchu bude nad miestom merania, tým vyšší tlak bude v mieste merania, lebo molekuly vzduchu sú tesnejšie pri sebe. V našom prípade je dôležité, pri odhade vyrobenej energie, pri projektovaní vedieť v akej nadmorskej výške bude umiestnená veterná turbína. Poloha veternej turbíny môže mať vplyv na dobu návratnosti investície.

Keď si vyjadríme tlak v ľubovoľnej výške v závislosti na tiaži veterného stĺpca nad danou výškou, plus tlak v danej výške dostávame závislosť:

$$p(z) = p(z + dz) + g \cdot \rho \cdot dz \quad (8)$$

kde g je gravitačné zrýchlenie (m/s^2), ρ - hustota vzduchu (kg/m^3), p - tlak vzduchu (Pa), z - výška (m).

Z tejto závislosti a obrázku môžeme vyjadriť prírastok tlaku dp pri zmene výšky o dz :

$$dp = p(z + dz) - p(z) = -g \cdot \rho \cdot dz \quad (9)$$

Z toho dostávame závislosť zmeny tlaku na zmene nadmorskej výšky:

$$\frac{dp}{dz} = -g \cdot \rho \quad (10)$$

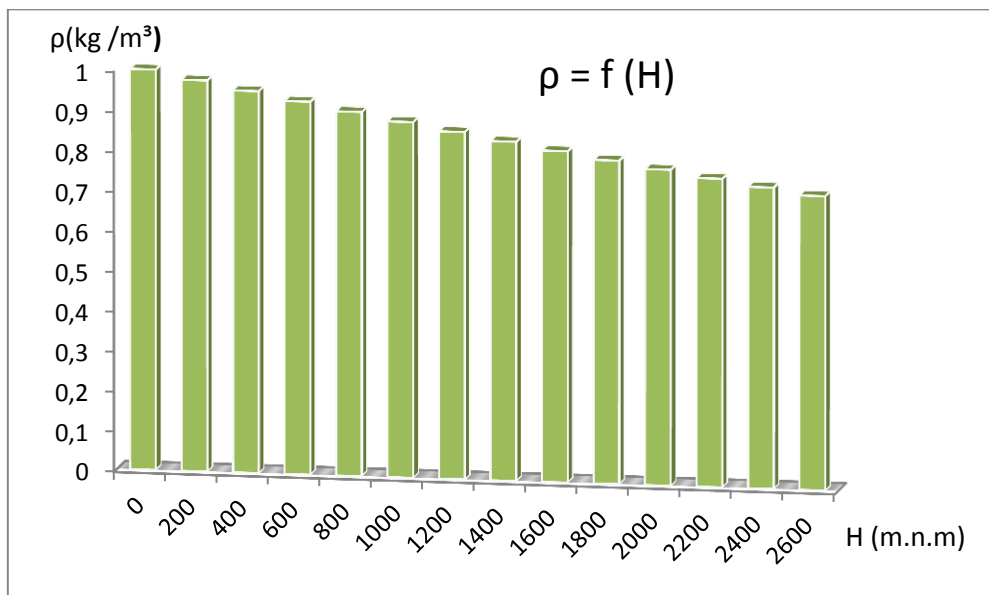
Dosadením (10) do (7) dostávame:

$$\frac{dp}{dz} = -\left(\frac{g \cdot M \cdot 10^{-3}}{R \cdot T}\right) \cdot p \quad (11)$$

Riešenie tejto diferenciálnej rovnice 1. rádu má tvar:

$$p = p_0 \cdot e^{-1,1851 \cdot 10^{-4} \cdot H} \quad (12)$$

kde p_0 je referenčný tlak (1 atm), na úrovni mora, H – výška (m.n.m.).



Obr. 6 Hustota vzduchu ako funkcia nadmorskej výšky

1.5 Výška veže veternej turbíny nad terénom

V predošlom texte sme si ukázali, že na výkon má najväčší vplyv rýchlosť vetra. Výkon na turbíne závisí od tretej mocniny rýchlosti vetra, preto pri hľadaní optimálneho miesta musíme dbať na to, aby sme turbínu umiestnili do takej výšky, aby bola rýchlosť vetra čo najmenej ovplyvnená okolitým terénom. Prvých niekoľko sto metrov nad terénom je rýchlosť vetra ovplyvnená trením vzduchu o zemský povrch. Relatívne hladké povrchy, ako pokojná voda, majú veľmi malý trecí odpor. Zmena rýchlosti zo zmenou výšky je relatívne bezvýznamná. Naopak v lesnatých a zastavaných oblastiach, teda v oblastiach so značnými nepravidlosťami v teréne je trecí odpor vysoký, tým klesá rýchlosť vetra (zvyšujú sa turbulencie). Vzťah na vyjadrenie vplyvu drsnosti terénu na rýchlosť vetra je definovaný ako:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln(\frac{H}{z})}{\ln(\frac{H_0}{z_0})} \quad (13)$$

kde z - drsnosti povrchu (m), H - výška nad terénom (m), v - rýchlosť vetra vo výške H , v_0 - rýchlosť vetra vo výške H_0 .

Tab. 1 Klasifikácia terénu pre logaritmickú metódu výpočtu

trieda drsnosti	klasifikácia terénu	z (m)
0	pokojná vodná hladina	0,0002
1	otvorené priestranstvá s minimálnym počtom vetrolamov	0,03
2	poľnohospodárska pôda s vetrolamami vzdialenými od seba 1km a viac	0,1
3	predmestia a poľnohospodárska pôda s početnými vetrolamami	0,4
4	mestská zástavba a lesy	1,6

Tab. 2 Rýchlosti vetra ako funkcia drsnosti terénu

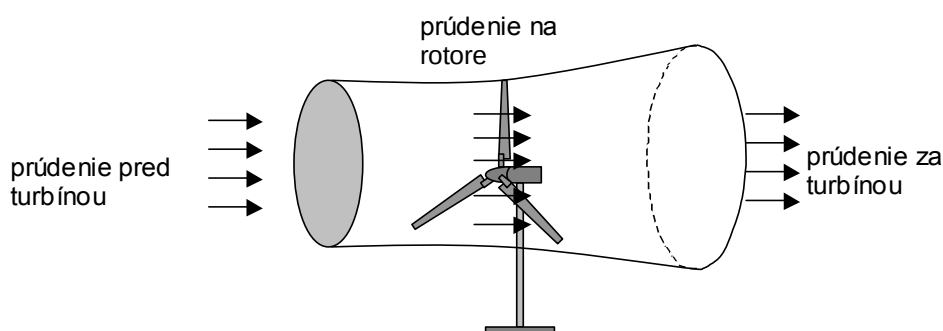
$H_0=10$ m	$v_0 = 4$ m/s	$\rho = 1,225$ kg/m ³			
Z (m)	0,002	0,03	0,1	0,4	1,6
H (m)	v (m/s)				
30	4,4	4,8	5	5,4	6,4
50	4,6	5,1	5,4	6	7,5
70	4,7	5,3	5,7	6,4	8,2
90	4,8	5,5	5,9	6,7	8,8
110	4,9	5,7	6,1	7	9,2
130	4,9	5,8	6,2	7,2	9,6
150	5	5,9	6,4	7,4	9,9

2 Výkonový činiteľ a maximálny výkon na turbíne

Albert Betz si uvedomoval tieto extrémny a dokázal matematicky vyjadriť maximálny výkon na turbíne nasledovným odvodením:

$$P_{TURB} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v^2 - v_d^2) \quad (13)$$

kde P_{TURB} je výkon na turbíne [W], $\dot{m}$ - hmotnostný prietok (kg/s), v - rýchlosť vetra pred turbínou (m/s), v_d - rýchlosť vetra za turbínou (m/s).



Obr. 7 Deformácia prúdenia pri interakcii s turbínou [2]

Pri prvotnom určení hmotnostného prietoku $\dot{m}$, môžeme uvažovať s plochou rotora teda dostávame vzťah:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_b \quad (14)$$

Po dosadení vzťahu (14) do vzťahu (13) dostávame tvar:

$$P_{TURB} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v + v_d) / 2 \cdot (v^2 - v_d^2) \quad (15)$$

Po úprave dostávame tvar :

$$P_{TURB} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{v_d}{v} \right) \cdot \left(1 - \frac{v_d^2}{v^2} \right) \right] \quad (16)$$

kde v - rýchlosť vetra pred turbínou, v_d - rýchlosť vetra za turbínou, v_b - rýchlosť vetra na listoch turbíny, P_{TURB} - výkon zachytený na listoch turbíny.

Vo vzorci (16) predstavuje časť pred zátvorkou výkon vetra. Výraz v zátvorke popisuje činiteľ výkonu. $C_p = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_d}{v} \right) \cdot \left(1 - \frac{v_d^2}{v^2} \right)$, ten vyjadruje mieru kinetickej energie zachytenej turbínou.

Výsledkom je základný vzorec na výpočet výkonu na turbíne :

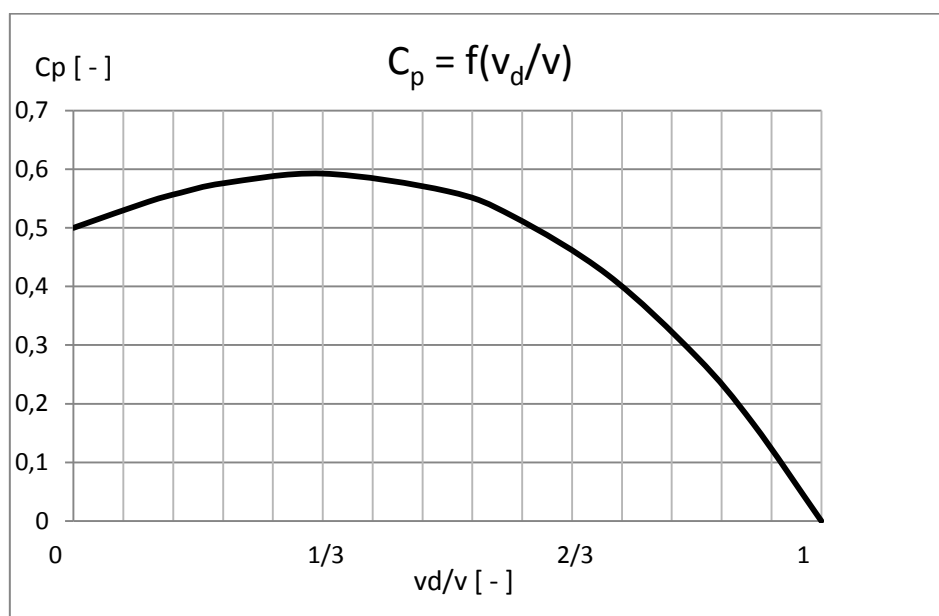
$$P_{TURB} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (17)$$

kde ρ – hustota vzduchu (kg/m^3), A – plocha opísaná rotorom (m^2), v – rýchlosť vetra pred turbínou, C_p – výkonový činiteľ.

Keď si zavedieme substitúciu $a = \frac{v_d}{v}$ nájdeme extrém funkcie C_p ako:

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 0 = \frac{1}{2} \cdot (1 + a) \cdot (1 - a^2) \quad (18)$$

Riešením rovnice je $a = 1/3$. Teda maximum výkonu z vetra dostaneme ak turbína spomalí prúdenie za turbínou oproti nenarušenému prúdeniu pred turbínou o túto hodnotu. Na obr. 8 je zobrazená závislosť $C_p = f\left(\frac{v_d}{v}\right)$



Obr. 8 Závislosť výkonového činiteľa od spomalenia prúdenia za turbínou

Na obr. 4.2 pri hodnote $\frac{v_d}{v} = 1/3$ dosiahol výkonový činiteľ maximum a to $C_p = \frac{16}{27} = 0,5925 = 59,25\%$ z výkonu vetra. Tomuto maximu sa hovorí Betzov limit a je to maximálna možná energia extrahovaná z vetra. Dôkladne skonštruované rýchlobežné veterné turbíny dosahujú zhruba 80 % tejto hodnoty. Teda sú na úrovni zhruba 47 %. Pre zadanú rýchlosť je výkonový činiteľ funkciou otáčok rotora. Ak sa rotor otáča príliš pomaly, hodnota výkonového činiteľa klesá, pretože vzduch ktorý prešiel cez turbínu odovzdal malú časť svojej kinetickej energie. Ak sa rotor otáča príliš rýchlo opäť výkonový činiteľ klesá. Dôvodom je, že lopatka veternej turbíny spôsobí turbulenciu a táto turbulencia prechádza na nasledujúcu lopatku. Najčastejšie sa udáva výkonový činiteľ ako závislosť súčiniteľa rýchlobežnosti λ . Súčiniteľ rýchlobežnosti λ je definovaný ako podiel rýchlosť pohybu konca lopatky veternej turbíny ku rýchlosti vetra:

$$\lambda = \frac{rpm \cdot \pi \cdot D}{60 \cdot v} \quad (19)$$

kde rpm - otáčky za minútu (ot/min.), D - priemer rotora (m), v - rýchlosť vetra (m/s).

V literatúre [3] je vyjadrené optimálny súčiniteľ rýchlobežnosti v závislosti na počte lopatiek veternej turbíny ako:

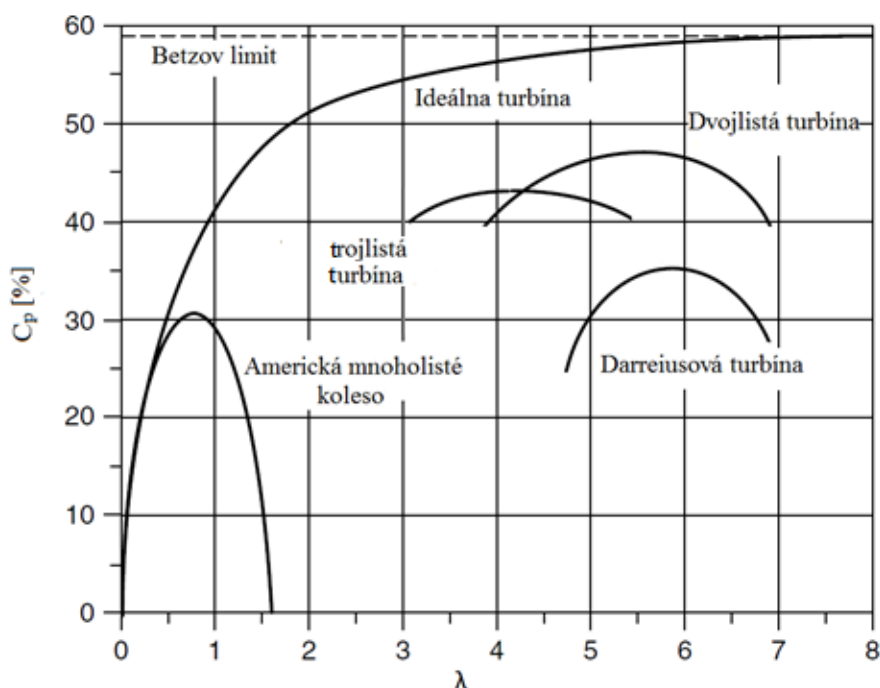
$$\lambda_{opt} = \frac{4\pi}{B} \quad (20)$$

kde B – počet lopatiek veternej turbíny

Pre turbínu s tromi listami dosahuje λ_{opt} hodnotu 4,19. Takisto sa v literatúre [37] uvádza, že dobre navrhnutá turbína dosahuje hodnoty vyššie o 25-30 %. Teda môžeme napísať:

$$\lambda_{opt} = \frac{4\pi}{B} (1,25 - 1,30) \quad (21)$$

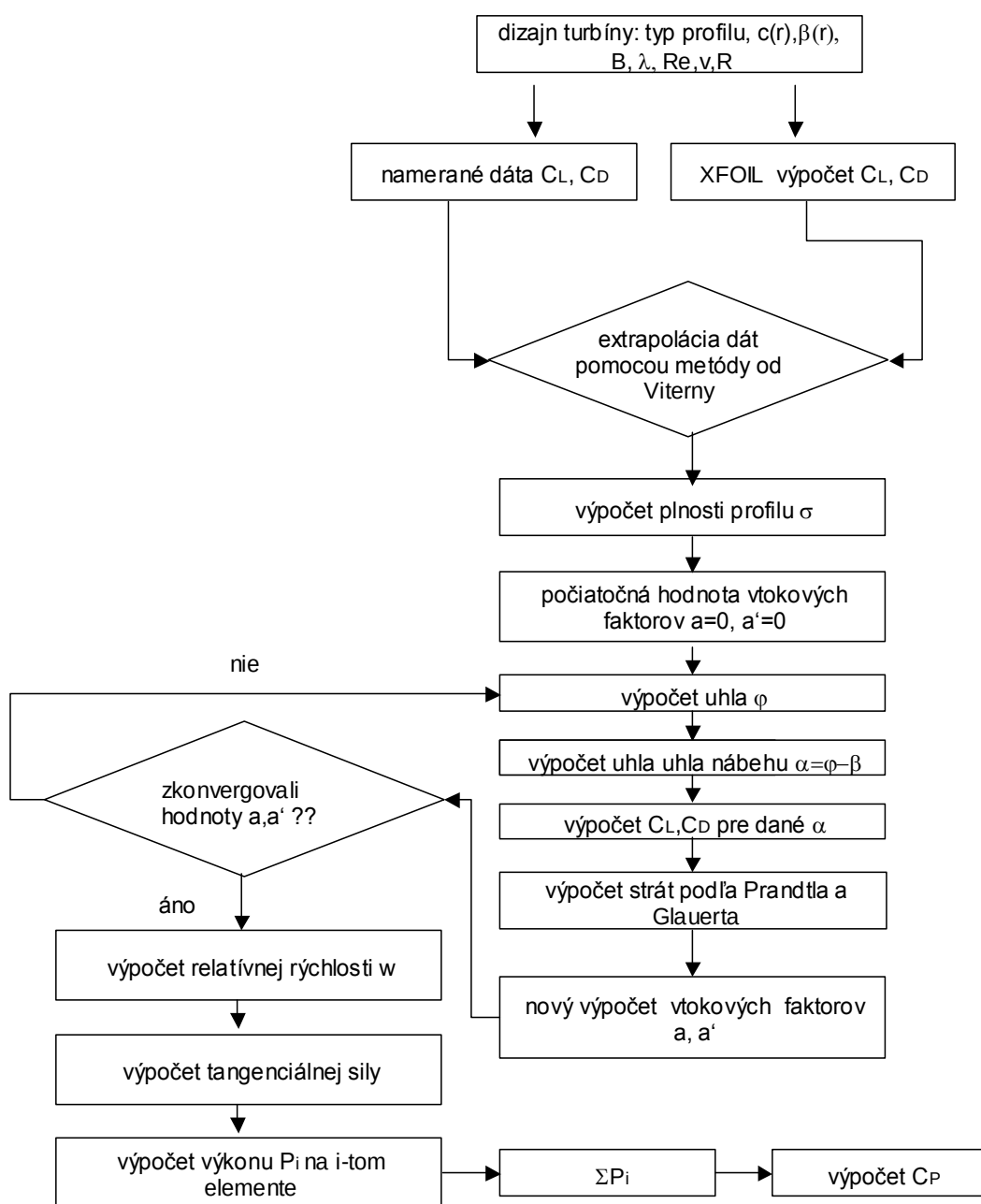
Pre trojlístú turbínu bude λ dosahovať hodnoty 5,24 -5,25. V praxi sa stretávame aj s vyššími hodnotami, pretože zvýšením rýchlosti nám poklesne účinnosť, ale na druhú stranu nepotrebujeme tak komplikovanú prevodovku, čo nám zníži náklady na zariadenie. To sa týka hlavne MW turbín.



Obr. 9 Závislosť výkonového činiteľa od súčiniteľa rýchlobežnosti [4]

3 Výpočet výkonu na turbíne pomocou BEM teórie

Blade Element Momentum teory (BEM) sa skladá z dvoch teórií a to z momentovej teórie a z teórie elementu lopatky. Jednotlivé teórie samostatne zlyhávajú, ale spoločne dávajú relatívne presný odhad výkonu na turbíne. Pomocou momentovej teórie sa dajú vyjadriť isté rovnice, ktoré v kombinácii s Blade Element Teory (BET) dávajú predbežné odhady výkonu na turbíne. Pri teórii elementu lopatky (BET) sa lopatka rotora rozdelí na n elementov a každý element sa prepočítava samostatne. Parciálne sily pôsobiace na jednotlivé elementy sa integrujú a výsledkom je moment na rotore a teda aj výkon na hriadeľi, axiálna sila a iné, pričom budeme vychádzať z literatúry [5], [6],[7],[8], [9], [10], [11], [12].



Obr. 10 Postup výpočtu BEM metódou

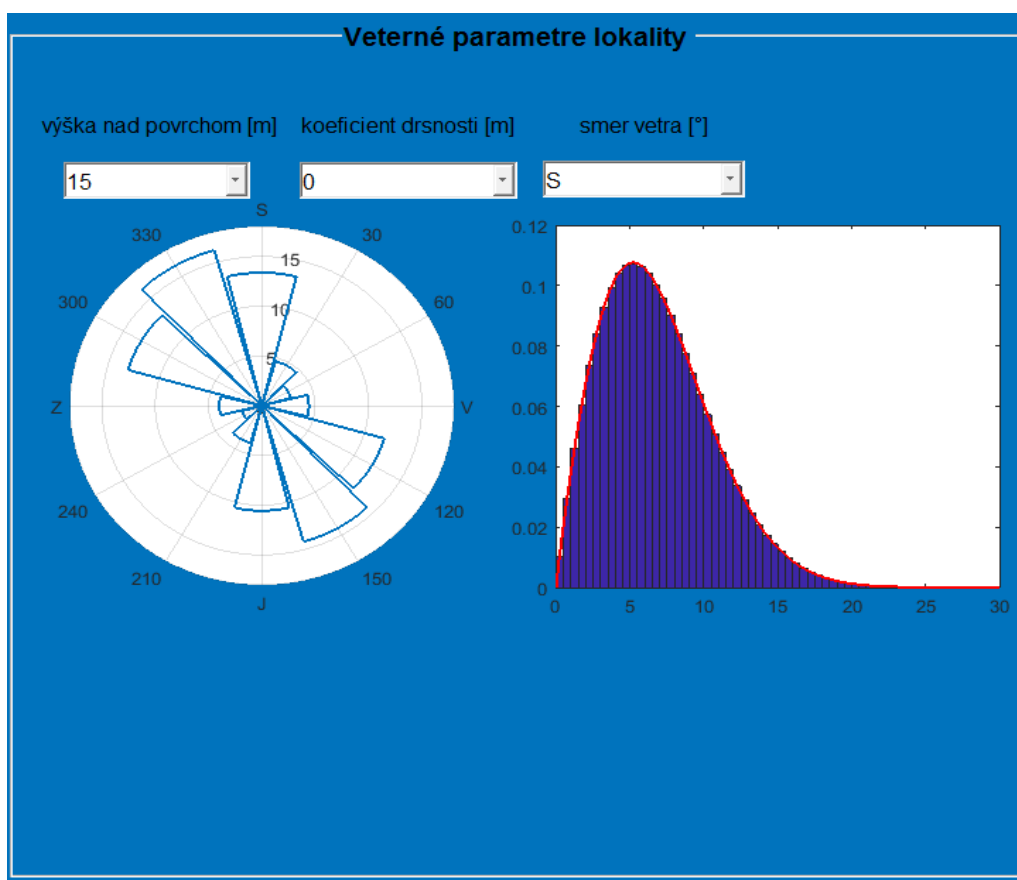
4 Matematický model na orientačný výpočet výkonu zariadenia na výrobu elektriny

V tejto časti práce aplikujeme teoretické poznatky z predošlého textu (teórie) a implementujeme ich do programu, ktorého výstupom bude predbežný výpočet energie existujúceho zariadenia pre konkrétnu lokalitu. Program bude mať vlastné užívateľské rozhranie a bude sa dbať na jednoduchosť a variabilitu vstupných podmienok. Programovacím jazykom bude Matlab. V prvej časti si rozoberieme ako do programu implementujeme veterné parametre danej lokality. Dbať budeme aj na výšku, v ktorej sa bude nachádzať gondola veternej turbíny a takisto na okolitý terén, ktorý bude mať vplyv na prúdenie. Táto časť bude prepojená s výkonovou krivkou turbíny. Výsledkom bude ročná výroba elektrickej energie v danej lokalite, ako aj parciálne výsledky vzhľadom na smer vetra a rýchlosť.

4.1 Výber lokality a Weibullovo rozloženie

Pre stanovenie koeficientov C a k Weibullovoho rozdelenia sme použili aplikáciu Global Wind Atlas [13]. Táto aplikácia dokáže určiť veterné parametre suchozemských a pobrežných lokalít a bola vyvíjaná na Dánskej technickej univerzite (DTU). Jedná sa v podstate o geografický informačný systém (GIS) na báze rastrových máp. Aplikácia je dostupná online a obsahuje viacero vrstiev, ako napríklad:

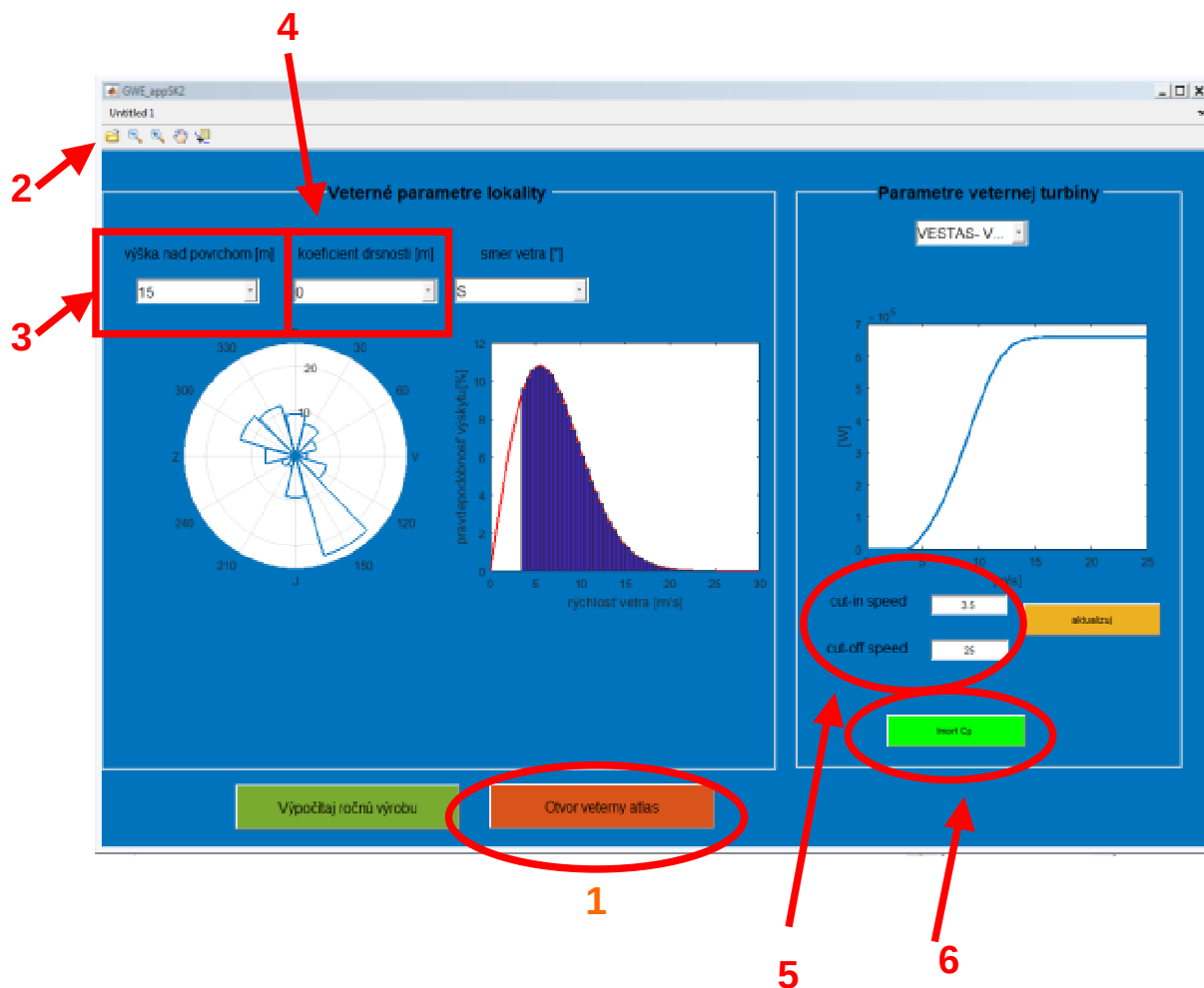
- hustotu výkonu vetra,
- energetické triedy podľa IEC 61400
- rýchlosť vetra,
- orografia,
- drsnosť alebo klasifikácia terénu.



Obr. 11 Časť programu na výpočet parametrov vybranej lokality

4.2 Výpočet ročnej výroby elektrickej energie

Ked' máme stanovené všetky parametre spustíme tlačidlom Vypočítaj ročnú výrobu výpočet (obr. 12).



Obr. 12 Ukážka programu na výpočet výkonu

Výpočet prebieha nasledovne - pre každý smer a sektor rýchlosti vetra, napríklad južný smer rýchlosť od 4-4,5 m/s sa vypočíta parciálna produkcia elektrickej energie nasledovne:

z juhu fúka 13% času= 0,13 a rýchlosť 4-4,5 m/s ma zastúpenie v tomto smere 10 % času=0,1

z toho dostávame frekvenciu $f(v_i)$ pre daný smer a rýchlosť ich vynásobením. Vyprodukovanú ročnú elektrickú energiu pre daný smer vypočítame ako:

$$E(v_i) = 8766 \cdot P(v_i) \cdot f(v_i) \quad (29)$$

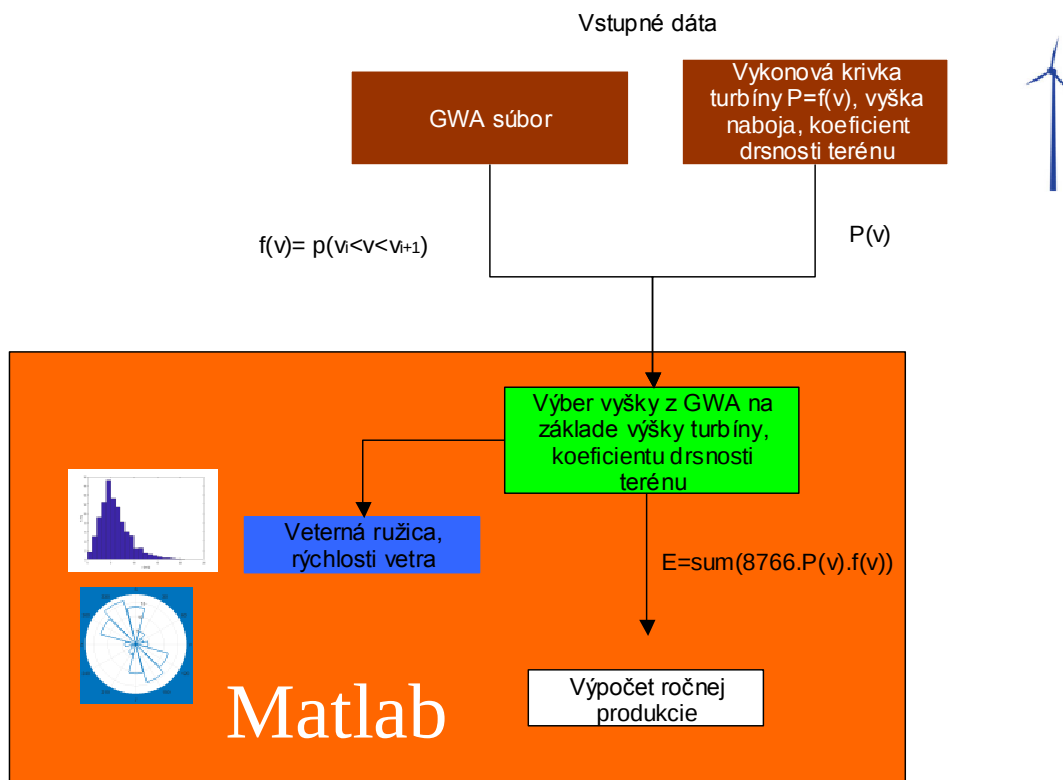
$$P(v_i) = [P(v_i) + (P_{v_{i+1}})] / 2 \quad (30)$$

Kde $E(v_i)$ je ročná produkcia pre danú rýchlosť vetra, $f(v_i)$ je frekvencia výskytu danej rýchlosti a $P(v_i)$ je stredný výkon turbíny daného sektoru rýchlosti.

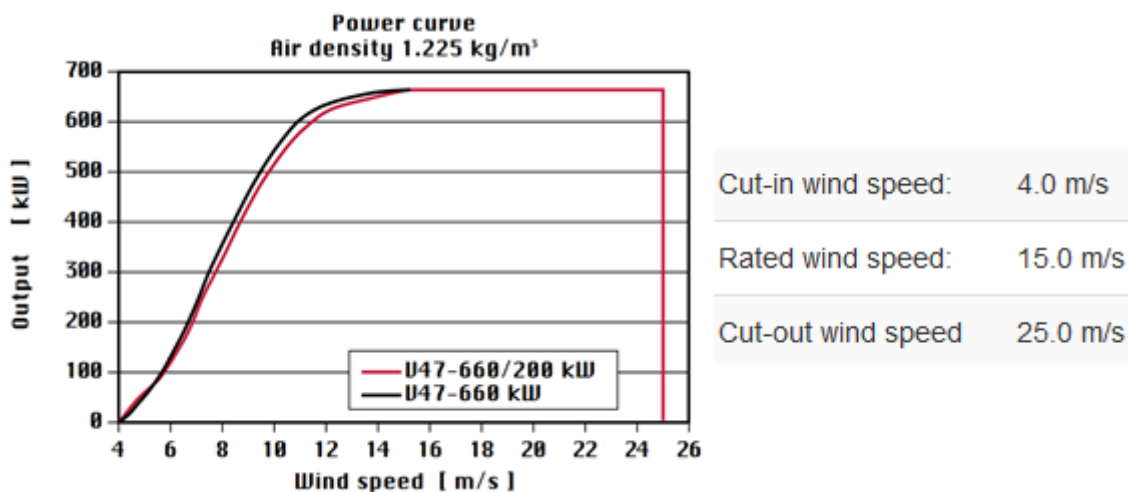
Súčtom všetkých rýchlostí v každom smere je celkový ročný výkon:

$$E(v_i) = \sum_{i=cut_in}^{cut_off} 8766 \cdot P(v_i) \cdot f(v_i) \quad (31)$$

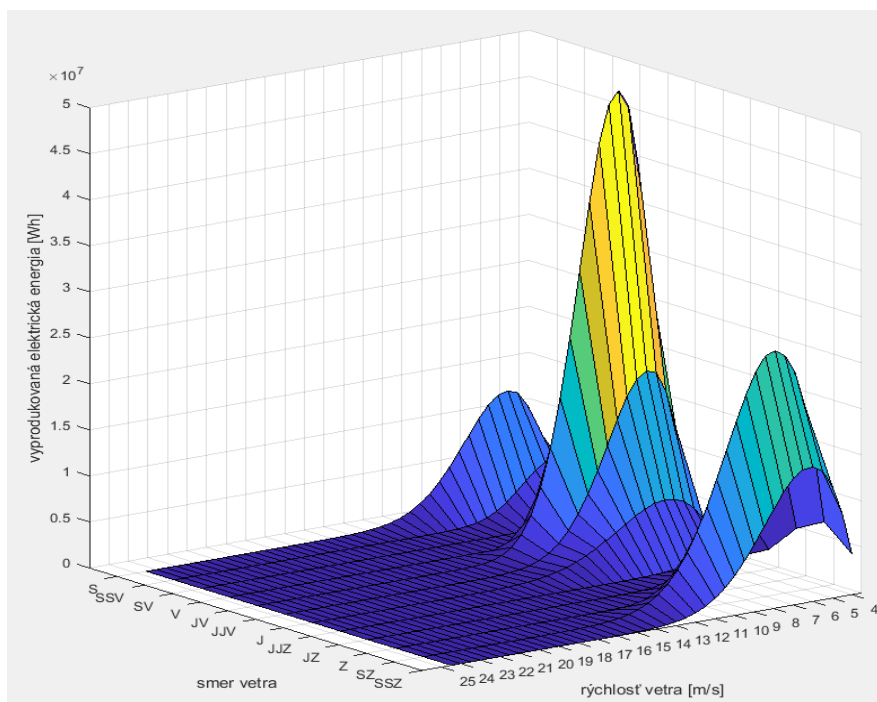
Na obr. 13 je znázornený princíp činnosti programu pre výpočet produkcie elektrickej energie.



Obr. 13 Princíp činnosti programu na výpočet ročnej výroby elektrickej energie



Obr. 14 Výkonová krivka turbíny VESTAS-V47-660 a V47-660/200X [14]



Obr. 15 Produkcia el. energie v závislosti na smere a rýchlosti vetra

Pre presné kvantifikovanie ročnej produkcie vo VP Cerová (pretože v literatúre [15] a [16] sú značné nepresnosti ohľadom ročnej výroby elektrickej energie) sme získali a použili dáta z Úradu pre reguláciu sieťových odvetví, ktorý nám poskytol dáta o produkcii v Cerovej za 3 roky. S dát boli určené priemerné hodnoty ročnej produkcie na 4674,15 MWh. Výsledná percentuálna chyba predstavuje 15,2 %. Z toho sa dá povedať, že program je dostatočne presný na prvotnú predikciu vyprodukovanej elektrickej energie. Výhodou programu Matlab je jeho variabilita. Do už stávajúceho programu sa dajú dopísať korekčné skripty, ktoré by v budúcnosti mohli chybu ešte znížiť. Netreba však zabúdať, že aplikácia Globálny veterný atlas neobsahuje namerané hodnoty, ale namodelované. Z toho možno vyvodiť záver, že nikdy nebudeme mať 100 % presnosť. Na druhej strane je vidieť, že aplikácia sa blíži k reálnym hodnotám, z toho dôvodu sa domnievame, že je zaujímavou pomôckou na prvotnú predikciu produkcie pred realizáciu veterného parku.

5 Program na výpočet výkonu vlastnej veternej turbíny

V tejto kapitole sa zameriame na výpočet výkonu vlastnej veternej turbíny. Program na výpočet bude odvodený na základe BEM metódy. Výsledkom by mala byť výkonová krivka pre zadané vstupné parametre.

5.1 Podprogram na výpočet hustoty vzduchu

Hustota vzduchu je na počiatku nastavená na štandardnú hodnotu 1,255 kg/m³. Podprogram na výpočet hustoty vzduchu z nameraných dát v okolí dokáže prepočítať hustotu vzduchu. Táto aplikácia sa dá využiť, ak poznáme teplotu blízkej meteorologickej stanice a sme napr. v kopcovitom teréne a chceme prepočítať hustotu vzduchu v zadanej výške.

Gui_tlak

Výpočet hustoty vzduchu v závislosti na teplote a nadmorskej výške

vstupné údaje

výška nad morom 1000 [m.n.m.]

namerané dáta

teplota 25 [°C] vo výške 500 [m.n.m.]

výstupné údaje

tlak v zadanej výške 0.88825 [atm]

hustota vzduchu 1.0633 [kg/m³]

teplota v hľadanej výške 21.75 [°C]

vypočítaj !! OK Cancel

Obr. 16 Podprogram na výpočet hustoty vzduchu

5.2 Podprogram na výpočet rýchlosti vetra

Ďalším krokom je určiť rýchlosť vetra. Otvoríme podprogram na výpočet rýchlosti vetra. Tento podprogram opäť ráta s nameranými údajmi, alebo údajmi o priemernej ročnej rýchlosti vetra v konkrétnej výške z aplikácie Global Wind Atlas. V programe boli zakomponované obe výpočtové metódy, logaritmická aj exponenciálna. Po výbere výpočtovej metódy treba vybrať koeficient drsnosti a zadať nameranú rýchlosť vetra, a v akej výške bola nameraná. Meteorologické stanice mávajú anemometre vo výške 10 m preto je táto hodnota preddefinovaná. Takisto je nutné zadať výšku náboja, v ktorej bude veterná turbína pracovať. Po zadaní parametrov a stlačení tlačidla vypočítaj program vypočíta rýchlosť vetra v danej výške. Po stlačení tlačidla OK sa nám hodnoty automaticky prepíšu v hlavnom programe a podprogram sa zavrie.

drsnost_terenu

Výpočet rýchlosti vetra zohľadňujúci výšku nad terénom a drsnosť terénu

vstupné údaje

výpočtová metóda
☒ logaritmická
☐ exponenciálna

mestská zástavba a lesy
pokojná vodná hladina, ľad, blato, piesok

nameraná rýchlosť vetra 4 [m/s] vo výške 10 [m]
výška náboja 20 [m]

výstupné údaje

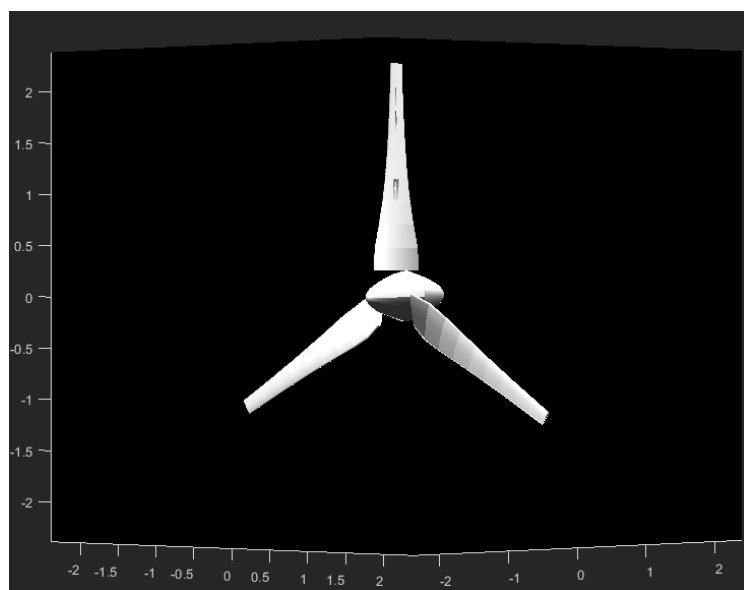
v = 5.5129 [m/s]

vypočítaj !! OK Cancel Help

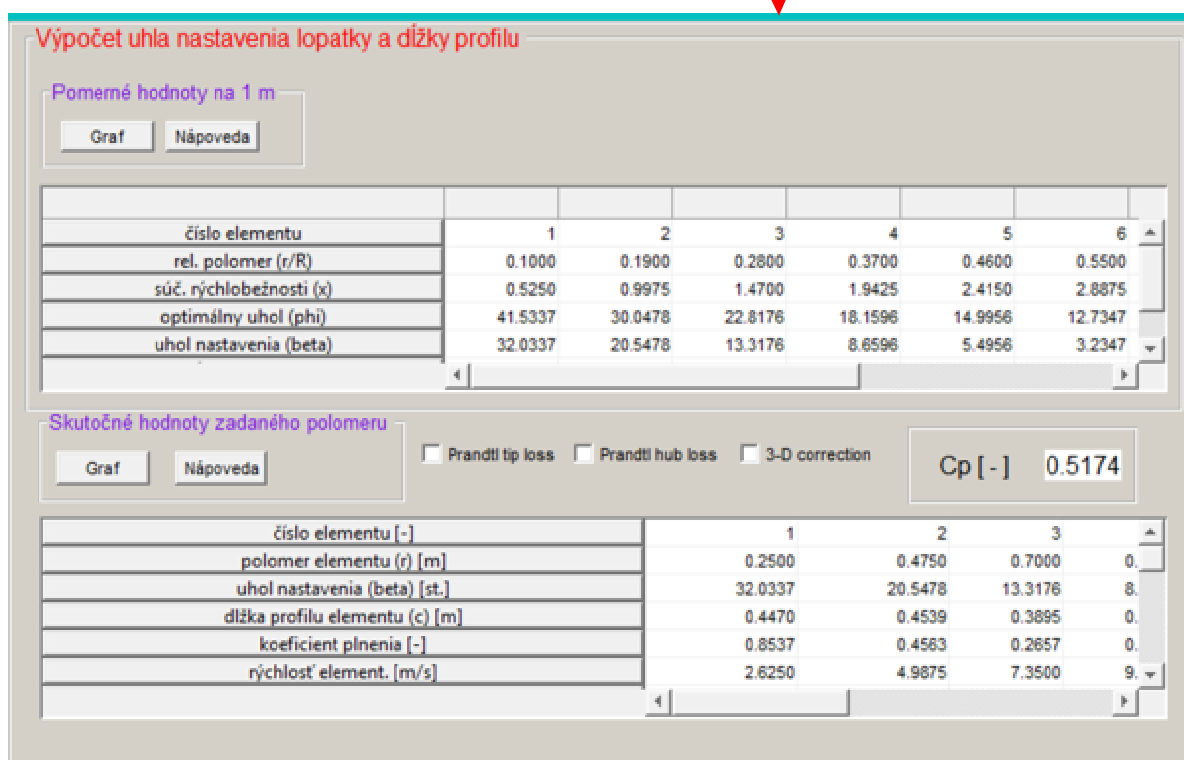
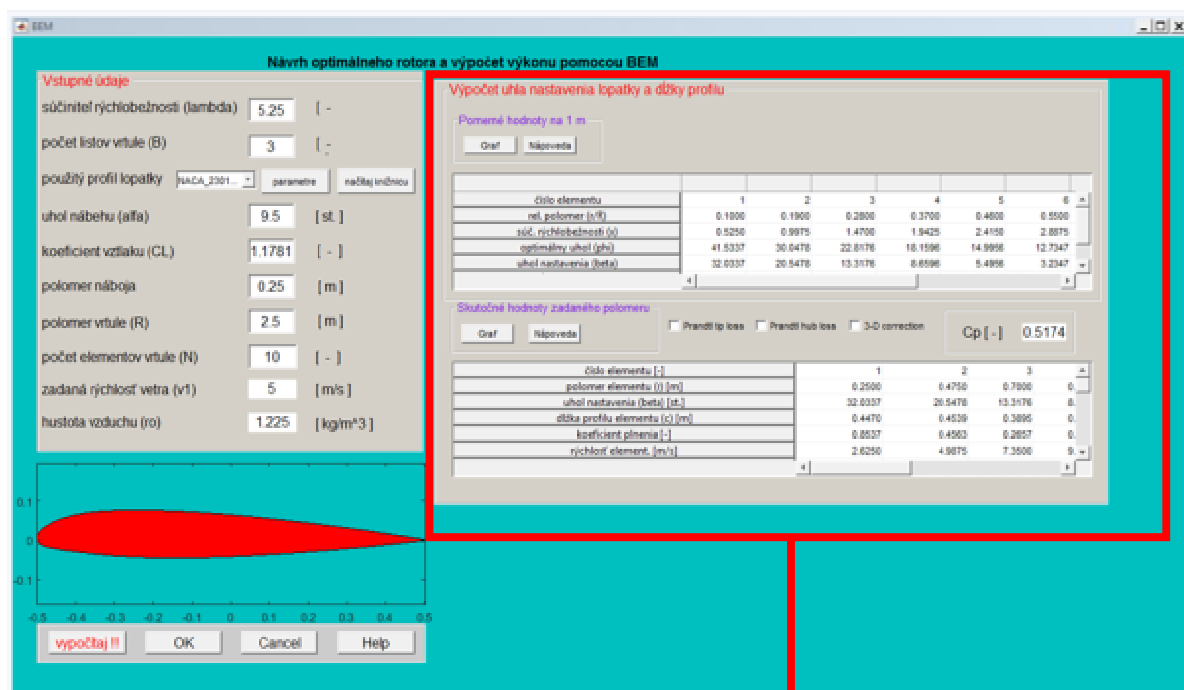
Obr. 17 Podprogram na výpočet rýchlosti vetra na základe drsnosti terénu

5.3 Podprogram na výpočet koeficientu výkonu

Po zadání hustoty vzduchu a rýchlosti prúdenia nasleduje vytvorenie algoritmu na výpočet geometrie a koeficientu výkonu C_p . Ak nepoznáme výkonový koeficient pri zadanej rýchlosti vetra a pre danú geometriu, spustíme tlačidlom edit podprogram na výpočet geometrie a koeficientu výkonu. Výsledkom je výpočet koeficientu výkonu C_p a vygenerovanie 3-D grafiky navrhutej turbíny.



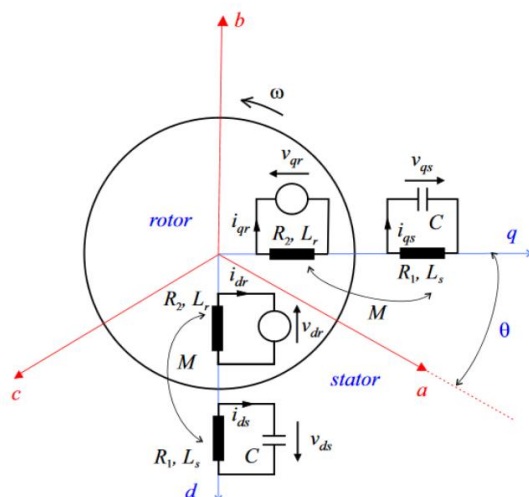
Obr. 18 Vygenerovaná 3-D grafika navrhutej veternej turbíny



Obr. 19 Výsledok výpočtu BEM metódou

6 Meranie a simulácia samo budeného indukčného generátora

V nasledujúcej časti práce sa budeme zapodievať indukčným generátorom s rotorom nakrátko a tvorbe jeho simulácie pri odporovej záťaži. Princíp činnosti samobudeného indukčného generátora (ďalej SEIG z ang. Self Excited Induction Generator) je založený na existencii remanentného magnetizmu v rotore z predošlej prevádzky. Indukčný generátor spotrebováva na vytvorenie magnetického poľa jalový výkon, ktorý musí byť zabezpečený. V on-grid prevádzke si generátor berie jalový výkon zo siete. Pri off-grid prevádzke je zdrojom jalového výkonu paralelne pripojená kondenzátorová batéria k statorovému vinutiu.



Obr. 20 Schéma indukčného generátora v d-q osi

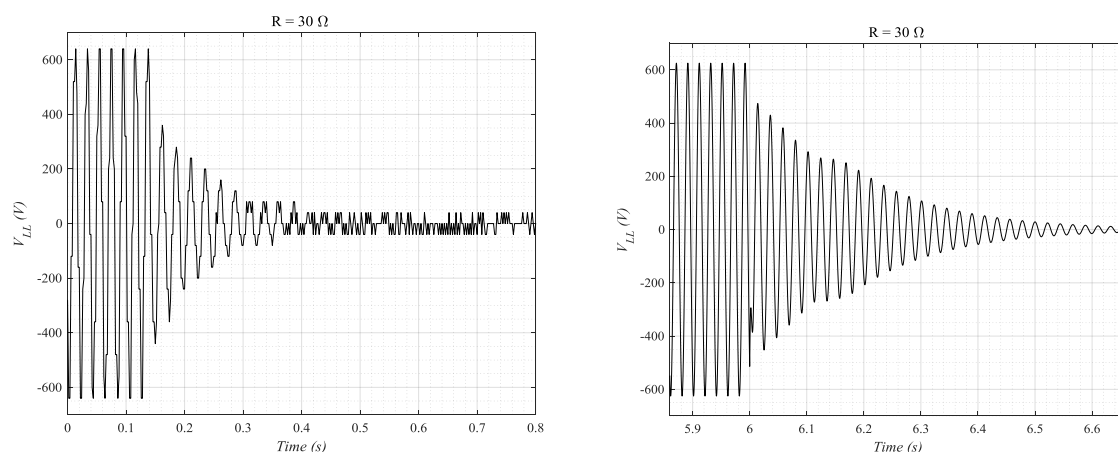
Kompletný tvar matice na výpočet SEIG [54], [55]:

$$p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ v_{Ld} \\ v_{Lq} \\ i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} R_1 L_2 & -\omega L_m^2 & -R_2 L_m & -\omega L_m L_2 & L_2 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_m^2 & R_1 L_2 & \omega L_m L_2 & -R_2 L_m & 0 & L_2 & 0 & 0 \\ -R_1 L_m & \omega L_m L_1 & R_2 L_1 & \omega L_1 L_2 & -L_m & 0 & 0 & 0 \\ -\omega L_m L_1 & -R_1 L_m & \omega L_1 L_2 & R_2 L_1 & 0 & -L_m & 0 & 0 \\ 1/CK & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/CK & 0 \\ 0 & 1/CK & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/CK \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/LK & 0 & -R/LK & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/LK & 0 & -R/LK \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ v_{Ld} \\ v_{Lq} \\ i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_2 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & -L_2 & 0 & L_m \\ L_m & 0 & -L_1 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & -L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix}$$

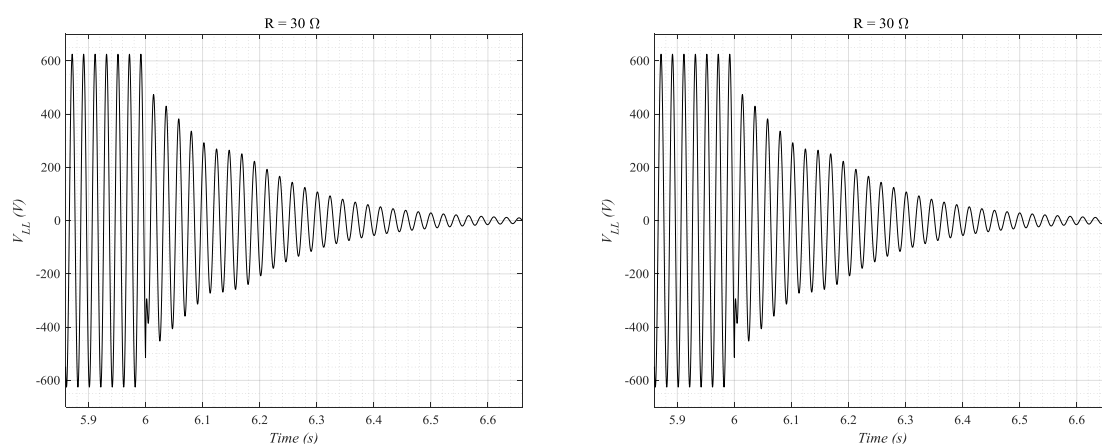
i_{ds} - statorový prúd v d- osi, i_{qs} - statorový prúd v q- osi, i_{dr} - rotorový prúd v d- osi, i_{qr} - rotorový prúd v q- osi, v_{Ld} = napätie záťaže v d- osi, v_{Lq} - napätie záťaže v q- osi, i_{Ld} - prúd záťažou v d - osi, i_{Lq} - prúd záťažou v q- osi, v_{ds} = napätie statora v d- osi, v_{qs} - napätie statora v q- osi, v_{dr} - napätie rotora v d- osi, v_{qr} - napätie rotora v q- osi.

6.1 Merania a simulácie indukčného generátora s odporovou záťažou

V tejto časti experimentu sme meral indukčný generátor zaťažný hodnotami činných odporov vo veľkosti 250 Ω , 50 Ω , 30 Ω . Generátor sme pohonným zariadením roztočili na 1500 ot./min. Po dosiahnutí stabilného napätia sme trojfázovým ističom pripli záťaž k statoru. Zaznamenávali sme hodnoty prúdu a napätia. Takisto sme zadali tieto hodnoty odporov postupne do simulácie a porovnali som výsledky so simuláciou.



Obr. 21 Združeného napätie na statore pri $R = 30 \Omega$

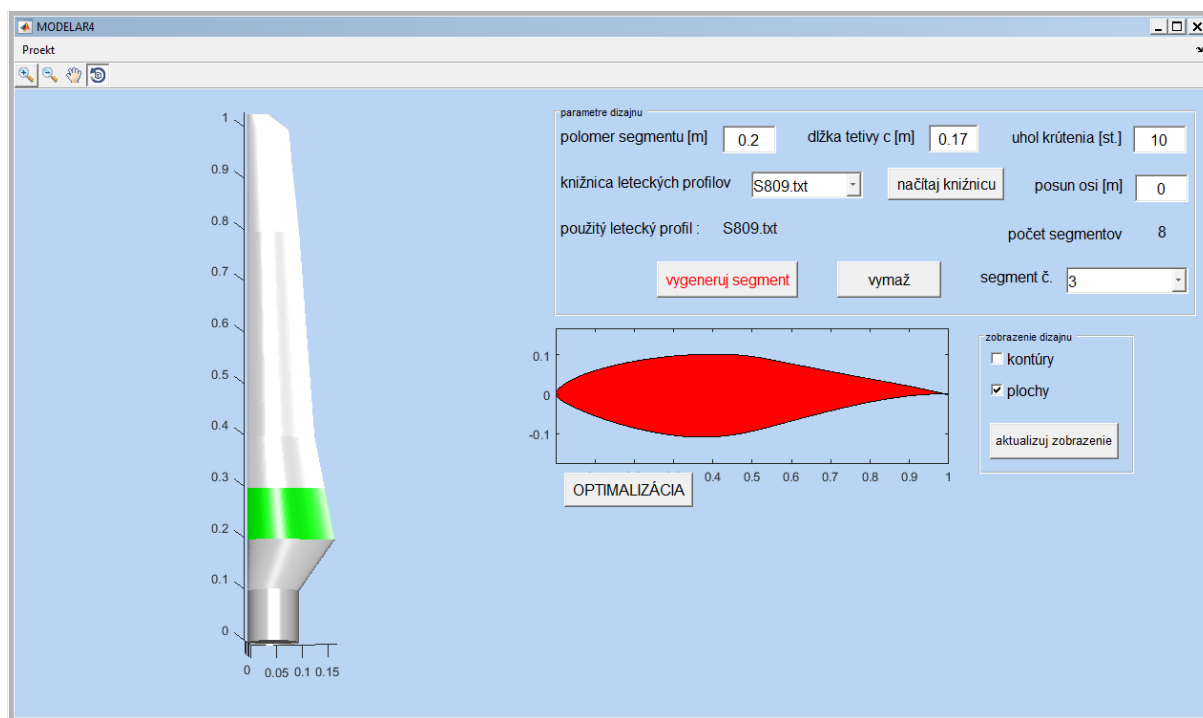


Obr. 22 Priebeh fázového prúdu na statore pri $R = 30 \Omega$ simulácia (vpravo), meranie (vľavo)

Výsledkom merania a simulácie bolo overiť dynamické správanie sa indukčného generátora pri odporovej záťaži a verifikovať výsledky simulačného modelu. Ten preukázal dobrú zhodu s meraním a dá sa konštatovať, že je použiteľný pri simuláciách.

7 Vytvorenie programu na 3-D modelovanie lopatky veternej turbíny

V nasledujúcom texte sa budeme snažiť popísať vytvorený modelár, v ktorom sa bude dať namodelovať lopatku veternej turbíny a bude vedieť komunikovať s programom XFOIL priamo a to cez textový súbor, ktorý si bude vedieť vygenerovať. Komunikácia bude obojsmerná kedy XFOIL splní príkazy z Matlabu a výstup vygeneruje opäť vo forme textového súboru, ktorý sa načíta do Matlabu na ďalšiu prácu s dátami. Pri zostavovaní algoritmu na výpočet geometrie lopatky budeme vychádzať opäť zo vzťahov sformulovaných Schmitzom a použitých v kapitole 8.

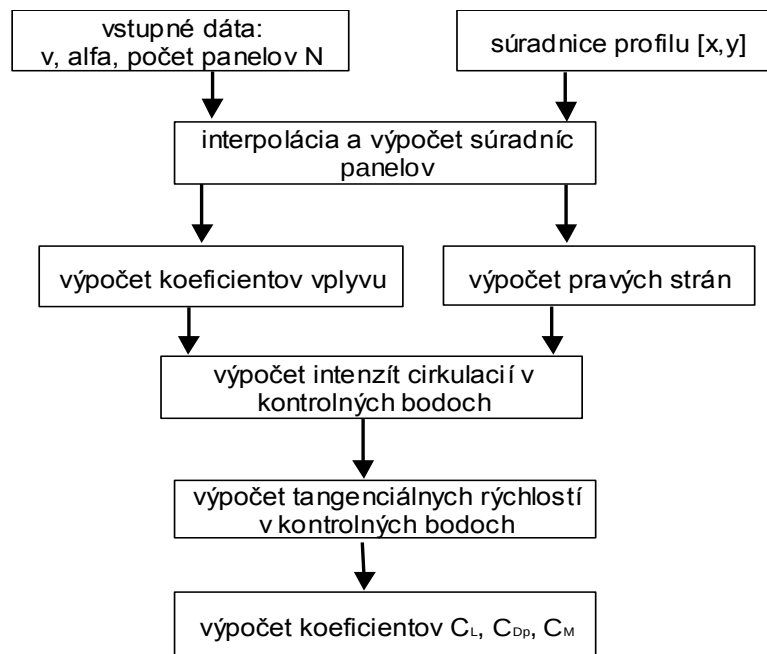


Obr. 23 Ukážka užívateľského rozhrania s ovládacími prvkami

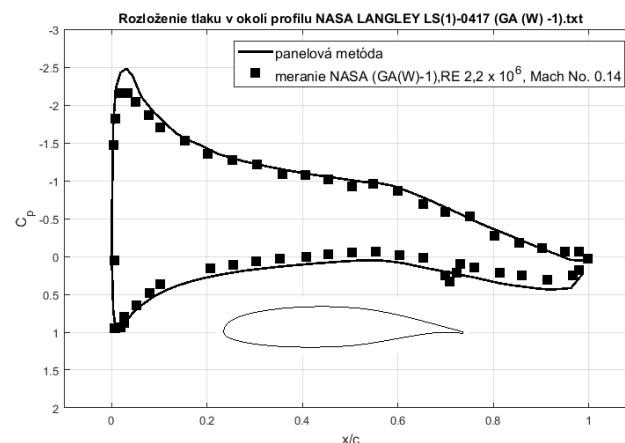
Program na vykreslenie lopatky potrebuje zadať parametre ako, polomer segmentu – je to vzdialenosť profilu od osi rotácie, dĺžka tetivy a uhol nastavenia lopatky (uhol krútenia β). Takisto treba zadať použitý letecký profil. Použité aerodynamické profile sú uložené v textových súboroch v zložke ktorú som nazval AIRFOIL_LIBRARY a obsahujú x, y súradnice profilu. Tato zložka sa automaticky načíta do rolovacej lišty, z ktorej si užívateľ vyberie vhodný profil. Po zadaní všetkých potrebných informácií užívateľ stlačí tlačidlo s názvom “vygeneruj segment” a program vytvorí v 3-D priestore 2-D segment podľa špecifikácie. Takto pokračujeme od segmentu k segmentu a výsledkom je 3-D geometria lopatky veternej turbíny.

8 Vytvorenie programu na výpočet parametrov 2-D leteckého profilu

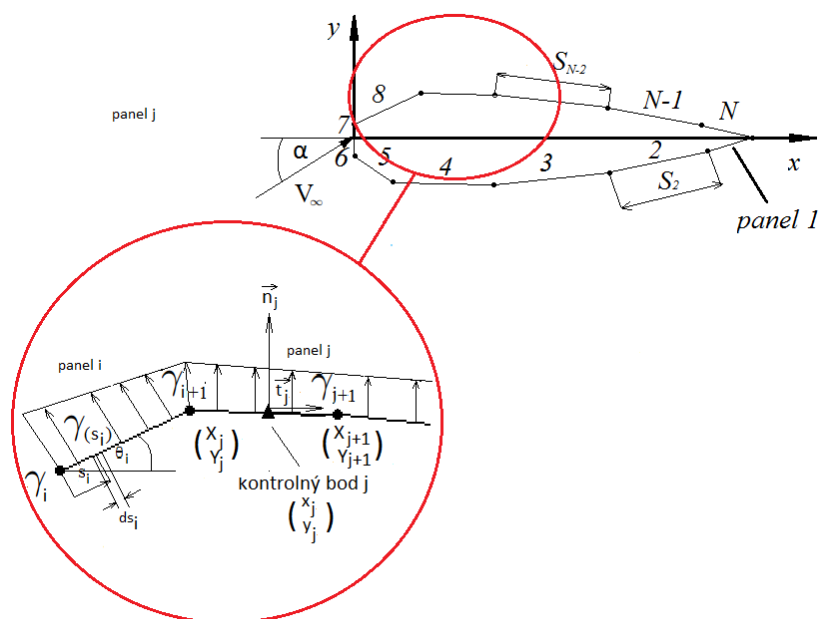
V nasledujúcom texte popíšeme výpočet koeficientu vztlaku C_L a momentu C_M ľubovoľného leteckého profilu, a to panelovou (mrežovou) metódou. Dôvodom je snaha obísť program XFOIL a do budúcnosti robiť výpočet čisto v Matlabe. Lopatka veternej turbíny je zostavená z leteckého profilu resp. profilov. Lopatka pri pretekanií vzduchu akceleruje. Túto akceleráciu zabezpečuje tvar leteckého profilu. Je preto dôležité použiť správny tvar a uhol nábehu. Na správny návrh musíme poznať správanie sa leteckého profilu, pod rôznymi uhlami nábehu. Takisto na výpočet pomocou BEM teórie musíme poznať parametre profilu, konkrétne koeficient odporu a vztlaku, pri rôznych uhloch nábehu.



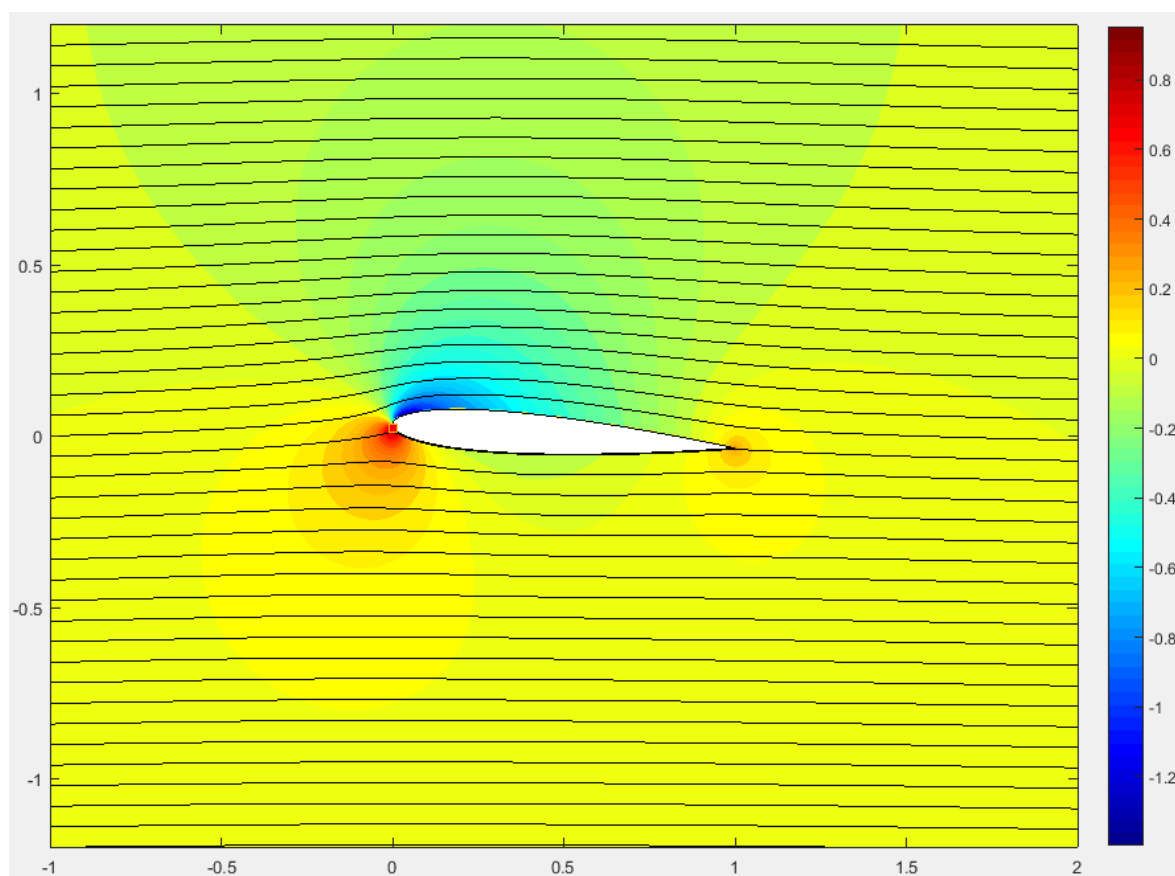
Obr. 24 Metodika pre zostavenie programu



Obr. 25 Verifikácia vypočítaných parametrov s nameranými dátami



Obr. 26 Náhrada geometrie leteckého profilu uzavretým polygónom a intenzity cirkulácií na panely



Obr. 27 Grafické zobrazenie rozloženia tlaku na profile

Prínos práce a výsledky

Dizertačná práca sa zaoberá problematikou veternej elektrárne pre použitie v ostrovných prevádzkach. Problematika zasahuje do komplexného systému, ktorý zahŕňa výber lokality pre umiestnenie veternej elektrárne, pohonné zariadenie (veternú turbínu), generátor a mnohé iné vplyvy uvedené v tejto práci, ktoré budú mať vplyv na produkciu elektrickej energie veternej elektrárne. Ten je zásadný a ovplyvňuje rentabilitu a opodstatnenie inštalácie takéhoto zariadenia, pretože svoje uplatnenie nachádzajú hlavne v lokalitách, kde je neekonomické stavať elektrickú prípojku, alebo v rozvojových krajinách, ktoré neprešli plošnou elektrifikáciou. Konkurencieschopnosť voči cene energie z konvenčných zdrojov je vďaka neefektívnej akumulácii elektrickej energie a nepredikovateľnosti takéhoto zdroja zatiaľ veľmi nízka. Využitie výsledkov v praxi môže byť hlavne v oblasti prvotného výpočtu produkcie elektrickej energie v ľubovoľnej lokalite a prepojenie výpočtu s aplikáciu Global Wind Atlas. Výsledkom dizertačnej práce je vytvorenie:

- matematického modelu na výpočet produkcie elektrickej energie veternej elektrárne na základe parametrov Weibullovoho rozdelenia získaného z aplikácie Global Wind Atlas a výkonovej krivky ľubovoľnej turbíny v ľubovoľnej lokalite,
- modelu geometrie veternej turbíny na základe teórie a výpočet koeficientu výkonu na základe vstupných parametrov vrátane grafickej interpretácie,
- matematického modelu dynamického správania sa indukčného generátora pracujúceho v ostrovej prevádzke s odporovou záťažou,
- 3-D modelára lopatky veternej turbíny s možnosťou optimalizácie,
- vytvorenie simulácie na výpočet aerodynamických koeficientov 2-D leteckých profilov.

Z dôvodu verifikácie simulácie s meraním, bolo realizované meranie na indukčnom generátore.

Použitelnosť výsledkov a prínosy

- Program vytvorený v prostredí Matlab na výpočet výroby elektrickej energie, ktorý môže byť použitý pre off-grid veterné elektrárne, rovnako ako aj pre on-grid veterné elektrárne.
- Použitie časti programu na výpočet výkonu na turbíne pre simulácie chodu a bezpečnosti ES SR a pripojiteľnosti nových veterných turbín.
- Rozšírenie časti programu o ekonomický model a overenia rentability inštalácie a doby návratnosti.
- Možnosť výpočtu namáhania lopatky veternej turbíny pri danej konfigurácii z výsledkov výpočtu síl na lopatke.
- Aplikácia dynamickej simulácie indukčného generátora v prepojení s veternou turbínou, alebo malou vodnou elektrárnou, či iným pohonným zariadením.
- Implementácia programu na báze panelovej metódy k výpočtom aerodynamických koeficientov, resp. hydrodynamických (po rozšírení o model medznej vrstvy). Použitie výsledkov pre výpočet výkonu na veterných turbínach, ako aj na prílivových turbínach používaných v mori.

Odporúčania pre ďalšiu prácu

- prepojenie jednotlivých podprogramov a ich integrácia, ktorej výsledkom by mal byť dynamický model veternej elektrárne,
- výpočet deformácie lopatiek na základe vypočítaných síl,
- vytvorenie prototypu na základe výpočtov geometrie,
- meranie prototypu vo veternom tuneli STU,
- simulácia turbíny v programe, ktorý počíta metódou konečných objemov,
- úprava panelovej metódy o výpočet medznej vrstvy.

Záver

Ostrovne systémy, alebo off-grid sa v podmienkach Slovenskej republiky využívajú sporadicky najmä z dôvodu ekonomickej neefektívnosti, a to hlavne kvôli uskladneniu vyrobenej elektrickej energie. V budúcnosti sa očakáva rast cien energií, čo bude mať za následok zefektívnenie skladovania vyrobenej energie. Naopak v krajinách, ako je Čína, kde elektrifikácia územia neprebehla tak intenzívne, sú dnes celé dediny zásobované elektrickou energiou z ostrovných systémov. Ostrovne systémy sa využívajú hlavne v rozvojových krajinách, ktoré vykazujú stabilný rast.

Cieľom dizertačnej práce je analyzovať a vybrať vhodný zdroj elektrickej energie na báze veternej energie. Veterná energia je nestály zdroj energie a preto sa musí pri výbere a inštalácii zariadenia, ktoré by vyrábalo elektrickú energiu v režime off-grid, dbať na rôzne aspekty. Dôraz sa kladol na faktory, ktoré by mohli ovplyvniť výkon tohto zariadenia produkujúceho elektrickú energiu, ako napríklad terén, konštrukčné vyhotovenie daného zariadenia, typ použitého generátora a pod. Výstupom je program na predikciu výkonu konkrétneho zariadenia v daných podmienkach.

V prvej časti sme sa zaoberali rozdelením veterných zariadení, konštrukčnými vyhotoveniami turbín a analyzovali sme možné výhody a nevýhody jednotlivých koncepcií. Takisto sme na základe teórie analyzovali vplyvy umiestnenia veterného zariadenia, ktoré by mohli mať negatívny dopad na produkovaný výkon. Tieto faktory sme implementovali do programu, ktorý bol súčasťou práce. Úlohu programu je vypočítať výkon na tomto zariadení. Na vytvorenie vlastného programu bol použitý program Matlab, konkrétne grafické užívateľské rozhranie.

Druhá časť práce bola zameraná na návrh lopatky veternej turbíny a výpočet koeficientu výkonu, pre daný profil, pri danej dĺžke lopatky a iných faktoroch. Na prepočet koeficientu výkonu bola použitá BEM teória, ktorá poskytuje uspokojivé výsledky pre prvotný odhad. BEM teória bola zvolená na základe jej jednoduchosti (oproti simulačným metódam alebo meraniam vo veternom tuneli) po časovej aj ekonomickej stránke. Tieto výpočty sme implementovali do programu.

Skúmala sa možnosť nasadenia indukčného generátora v ostrovej prevádzke. Bol vytvorený simulačný program, a tiež bolo realizované meranie na reálnom stroji s cieľom overenia výstupov zo simulácie.

Výsledkom práce bolo vytvoriť platformu na výpočet výkonu na veterných elektrárnach, ktorá by bola využiteľná aj na on-grid aj off-grid prevádzku. Pri trende znižovania emisií a zvyšovania podielu OZE, takisto zlepšovania akumulácie elektrickej energie a nasadzovania smart-grid technológií nie je nereálne, že v budúcnosti sa stanú ostrovne systémy na báze veternej energie zaujímavé z investičného aj environmentálneho hľadiska.

Použitá literatúra

- [1] [online]. Dostupné z: http://www.ener-supply.eu/downloads/ENER_handbook_slov1.pdf.
- [2] MASTERS, G. Renewable and Efficient Electric Power Systems, Wiley-IEEE Press, 2003.
- [3] M. Ragheb and A. M. Ragheb, Wind turbines theory—The Betz equation and optimal rotor tip speed ratio, fundamental and advanced topics in wind power. In R. Carriveau (ed.), Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, InTech, 2011.
- [4] JANÍČEK, F. - DARULA, I. - GADUŠ, J. - REGULA, E. - SMITKOVÁ, M. - POLONEC, Ľ. - ĽUDVÍK, J. - KUBICA, J. Obnoviteľné zdroje energie 1 : Technológie pre udržateľnú budúcnosť. Bratislava: Renesans, s.r.o., 2007. 171 s. ISBN 978-80-969777-0-3.
- [5] Glauert, H., “The Analysis of Experimental Results in Windmill Brake and Vortex Ring States of an Aircscrew,” Reports and Memoranda, No. 1026 AE. 222, 1926.
- [6] Gundtoft, Soren, University of Aarhus. “Wind Turbines”. Copyright 2009.
- [7] Manwell, J.F.; McGowan, J.G.; Rogers, A.L. 2002. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. New York: John Wiley & Sons.
- [8] Stankovic, Sinisa. Urban Wind Energy. Virginia: Earthscan, 2009.
- [9] Moriarty, P. J., and Hansen, A. C., 2005. Aerodyn theory manual. Tech. rep., NREL, Golden CO.
- [10] Grant Ingram (2011), Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method, Durham University.
- [11] Abbot, I., von Doenhoff, A. “Theory of Wing Sections Including a Summary of Airfoil Data”. Dover Publications, Inc. Copyright 1959.
- [12] Hansen, M.O.L. Aerodynamics of Wind Turbines, 3rd ed., Routledge, 2015 ISBN 978-1138775077.
- [13] Global Wind Atlas. Global Wind Atlas [online]. Dostupné z: <https://globalwindatlas.info/>.
- [14] Vestas V47 - 660,00 kW - Wind turbine. Welcome to wind-turbine-models.com [online]. Copyright © 2011 [cit. 05.06.2019]. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/13-vestas-v47>.
- [15] Green energy slovakia | Vietor - green energy slovakia. [online]. Dostupné z: <http://greenenergy.sk/sk/nase-referencie/vietor/>.
- [16] Veterná elektráreň – Cerová. Cerová – Obec pod hradom Korlátko [online]. Dostupné z: <http://obeccerova.sk/o-cerovej/veterna-elektraren/>.

Publikácie autora

ADN Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

- ADN01 ZUŠČAK, Jozef - KUJAN, Vladimír - JANÍČEK, František. Simulations and measurements on a self-excited induction generator. In *Journal of Electrical Engineering*. Vol. 69, No. 5 (2018), s. 359-365. ISSN 1335-3632 (2017: 0.508 - IF, 4 - JCR Best Q, 0.205 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: WOS: 000453413200005 ; SCOPUS: 2-s2.0-85059595953.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 JANÍČEK, František - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - HALÁN, Igor - ZUŠČAK, Jozef - CERMAN, Anton - HOLJENČÍK, Jozef. E-learning project - Power engineering dictionary. In *Distance learning, simulation and communication 2015 : International conference*. Brno, Czech Republic. May 19-21, 2015. Brno : University of Defence, 2015, S. 58-63. ISBN 978-80-7231-992-3, 978-80-7231-993-0 (CD-ROM).

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 BENDÍK, Jozef - CENKÝ, Matej - ZUŠČAK, Jozef - ELESCHOVÁ, Žaneta. 3D calculation of magnetic induction created by overhead power lines. In *ELITECH'18 [elektronický zdroj] : 20th Conference of doctoral students*. Bratislava, Slovakia. May 23, 2018. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, CD-ROM, [6] p. ISBN 978-80-227-4794-3.
- AFD02 CENKÝ, Matej - BENDÍK, Jozef - ELESCHOVÁ, Žaneta - ZUŠČAK, Jozef. Innovative and automated electrical parameters computations approach for overhead transmission lines. In *ELITECH'18 [elektronický zdroj] : 20th Conference of doctoral students*. Bratislava, Slovakia. May 23, 2018. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, CD-ROM, [5] p. ISBN 978-80-227-4794-3.
- AFD03 JANÍČEK, František - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - CERMAN, Anton - FARKAS SMITKOVÁ, Miroslava - ZUŠČAK, Jozef - HALÁN, Igor. Step by step to the world of energy by eLearning technologies. In *ICETA 2014 [elektronický zdroj] : 12th IEEE International Conference on Engineering eLearning Technologies and Applications*. December 4-5, 2014 Starý Smokovec, Slovakia. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2014, CD ROM, s. 63-68. ISBN 978-1-4799-7738-3.
- AFD04 ZUŠČAK, Jozef - JANÍČEK, František - VÁRY, Michal. Simulation of electromagnetic release used in miniature circuit breakers. In *ELITECH'15 [elektronický zdroj] : 17th*

Conference of doctoral students. Bratislava, Slovak Republic, May 25, 2015. 1. vyd.
Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-227-4358-7.

- AFD05 ZUŠČAK, Jozef - JANÍČEK, František. Calculation of power produced on wind turbine using blade element momentum theory. In *Power engineering 2016. Renewable Energy Sources 2016 : 6th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovakia. May 31 - June 2, 2016. 1. vyd.* Bratislava : Slovak University of Technology, 2016, S. 189-194. ISBN 978-80-89402-82-3.
- AFD06 ZUŠČAK, Jozef - JANÍČEK, František. Calculation of wind turbine power using Matlab. In *ELITECH'16 [elektronický zdroj] : 18th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. June 8, 2016. 1. vyd.* Bratislava : STU, 2016, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-4561-1.
- AFD07 ZUŠČAK, Jozef - JANÍČEK, František. Graphical user interface for 3D design and optimization of the blades for wind turbines applications. In *ELITECH'17 [elektronický zdroj] : 19th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 24, 2017. 1. ed.* Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, [6] p. ISBN 978-80-227-4686-1.
- AFD08 ZUŠČAK, Jozef - JANÍČEK, František - VÁRY, Michal - HÜTTNER, Ľudovít. Theoretical and experimental approach to the issue of limiting short-circuit current in the LV circuits. In *Elektroenergetika 2017 [elektronický zdroj] : 9th International scientific symposium on electrical power engineering. Stará Lesná, Slovak Republic. September 12-14, 2017. Košice : Technical University of Košice, 2017, CD-ROM, S. 650-655. ISBN 978-80-553-3195-9. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85029693808 ; WOS: 000431847700126.*
- AFD09 ZUŠČAK, Jozef - JANÍČEK, František - KUJAN, Vladimír - VÁRY, Michal. Dynamic behavior of self-excited induction generator in Off-grid operation under resistive load. In *Power engineering 2018. Control of Power Systems 2018 : 13th International scientific conference. Tatranské Matliare, Slovakia. June 5-7, 2018. 1. vyd.* Bratislava : Slovak University of Technology, 2018, S. 89-94. ISBN 978-80-89983-00-1.

BAB Odborné monografie vydané v domácich vydavateľstvách

- BAB01 FARKAS SMITKOVÁ, Miroslava - STUCHLÍKOVÁ, Ľubica - HOLJENČÍK, Jozef - HALÁN, Igor - ZUŠČAK, Jozef - CERMAN, Anton. *Energetický slovník pre základné a stredné školy. 1. vyd.* Nitra : Nitrianske tlačiarne, 2014. 200 s. ISBN 978-80-227-4274-0.

BAB02 JANÍČEK, František - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - FARKAS SMITKOVÁ, Miroslava - HOLJENČÍK, Jozef - CERMAN, Anton - ZUŠČAK, Jozef - HALÁN, Igor. *Tajomný svet energie* [elektronický zdroj]. 1.vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014. CD ROM, [interaktívny obsah]. ISBN 978-80-227-4281-8.