

Jakub Urbanský, Ľubomír Beňa, Daniel Pál, Michal Ivančák, Michal Márton

Možnosti výroby elektrickej energie z malej veternej turbíny

V súčasnosti je možné zaznamenať zvýšený dopyt po praktickej aplikácii obnoviteľných zdrojov energie. Medzi najviac používané obnoviteľné zdroje elektrickej energie je možné zaradiť fotovoltické články a veternej turbíny. Tieto môžu byť využívané vo veľkých farmách respektíve elektrárnach, alebo v domácnostiach vo forme off-grid systémov alebo ako doplnkové zdroje v hybridných systémoch. Preto je dôležitou úlohou správne odhadnúť výrobu elektrickej energie z takýchto zdrojov. Hlavným cieľom tohto článku je preskúmať teoretický základ malých veternej turbín na použitie v domácnosti a realizovať počítačovú simuláciu jedenej turbíny. Pre potreby simulácie bol v prostredí Matlab Simulink implementovaný počítačový model malej veternej turbíny. Na základe vykonaných simulácií s využitím dát získaných z merania rýchlosti vetra na oddelení Katedry elektroenergetiky v Košiciach je možné konštatovať len zanedbateľný potenciál malej veternej turbíny.

Kľúčové slová: Matlab Simulink, simulácia, malá veterná turbína, obnoviteľné zdroje

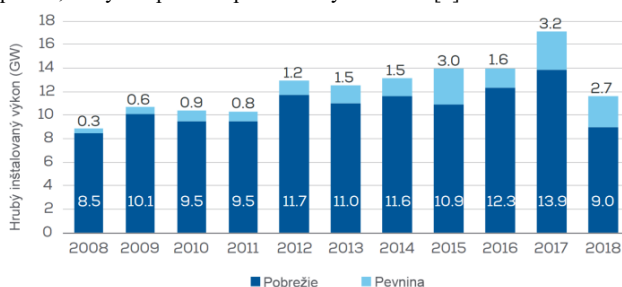
At present, there is an increased demand for the practical application of renewable energy sources. The most widely used renewable electricity sources include photovoltaic cells and wind turbines. These can be used in large farms or power plants, or in homes in the form of off-grid systems or as additional resources in hybrid systems. Therefore, it is an important task to correctly estimate the production of electricity from such sources. The main objective of this article is to explore the theoretical basis of small wind turbines for home use and to implement a model of small wind turbine and carry out computer simulation. A computer model of a small wind turbine was implemented in the Matlab Simulink environment for the purposes of simulation. On the basis of performed simulations using data obtained from wind speed measurement at the Department of Electrical Power Engineering in Košice it is possible to state only negligible potential of a small wind turbine. **(Possibilities of electricity production from small wind turbine)**

Keywords: Matlab Simulink, simulation, small wind turbine, renewables

I. ÚVOD

So stále rastúcim počtom svetovej populácie rastie prirodzene aj dopyt po energii, najmä elektrickú energiu. Je všeobecne známe, že energia uložená vo fosílnych palivách bude v najbližších rokoch vyčerpaná. Preto je dôležité rozvíjať nové zdroje energie a využívať už existujúce alternatívne a obnoviteľné zdroje na uspokojenie celosvetového dopytu po energii s čo najmenším zaťažením životného prostredia. V súčasnosti sa na domácej i medzinárodnej úrovni zvyšuje popularita výroby elektriny z obnoviteľných zdrojov, a to ako vo veľkých fotovoltických a veternej elektrárnach, tak aj v miestnych podmienkach, ako sú výrobné haly, farmy, rodinné domy atď.

V roku 2018, bol výkon vo veternej inštaláciách v Európe znížený na 11,7 GW, pričom 0,4 GW sa vyradilo z prevádzky (pozri Obr. 1). V porovnaní s 17,1 GW v roku 2017 to bol významný pokles, ktorý bol pre Európu rekordným rokom. [1]



Obr. 1. Hrubý podiel inštalovaného výkonu vo veternej elektrárnach na pevnine a na pobreží [1].

Hlavným cieľom tohto článku bude preskúmať možnosti výroby elektriny z malej veternej turbíny v lokalite Košice.

Primárnym cieľom je vytvorenie modelu konkrétnej veternej turbíny v simulačnom softvéri Matlab Simulink.

Sekundárnym cieľom bude realizácia simulácie založenej na meraniach rýchlosti vetra realizovaných na Katedre elektroenergetiky v Košiciach.

II. VETERNÁ ENERGIA

Slnčné žiarenie ohrieva povrch ako povrch Zeme tak aj atmosféru. Teplotný rozdiel medzi atmosférou a zemským povrchom spôsobuje prúdenie vzduchu, ktorý je zdrojom veternej energie. [2]

Energia pohyblivej hmoty vzduchu môže byť vyjadrená rovnicou kinetickej energie (1) [3]:

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

Kde:

m - hmotnosť (kg)

v - rýchlosť pohybujúcej sa hmoty ($m \cdot s^{-1}$)

Nasledujúca rovnica (2) sa vzťahuje na hmotu [3]:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \quad (kg) \quad (2)$$

Kde:

A - plocha, ktorou preteká daný objem vzduchu (m^2)

s - vzdialenosť, ktorú daný vzduch opíše (m)

Na základe (1) a (2) pre veternej energiu prúdiacu cez jednotku plochy je možné stanoviť nasledujúcu rovnicu (3) [3]:

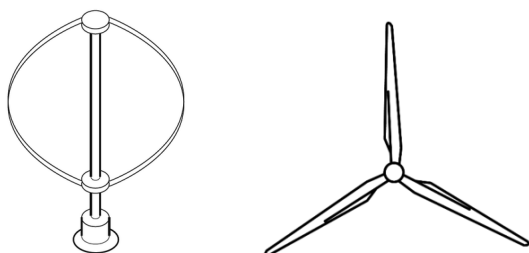
$$P_v = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 (W \cdot m^{-2}) \quad (3)$$

VETERNÁ TURBÍNA

Veterná turbína je zariadenie, ktoré premieňa kinetickú energiu vetra na mechanickú energiu. Vo veterných elektrárnach sa kinetická energia premieňa na mechanickú energiu, ktorá sa následne premieňa na elektrickú energiu. [3]

Podľa osí otáčania je možné rozdeliť veterné turbíny na (pozri Obr. 2.) [3]:

- vertikálne,
- horizontálne.



Obr. 2. Vertikálna (vľavo) a horizontálna (vpravo) turbína.

III. POPIS MODELU

Kvôli nízkym priemerným rýchlostiam vetra v lokalite Košice, bola zvolená turbína Airdolphin PRO Z-1000-48 (Obr. 3.) z dôvodu nízkej rozbehovej rýchlosti vetra (pozri Tab. 1.). [4]



Obr. 3. Zvolená veterná turbína

TABUĽKA I
Technické parametre danej turbíny [4].

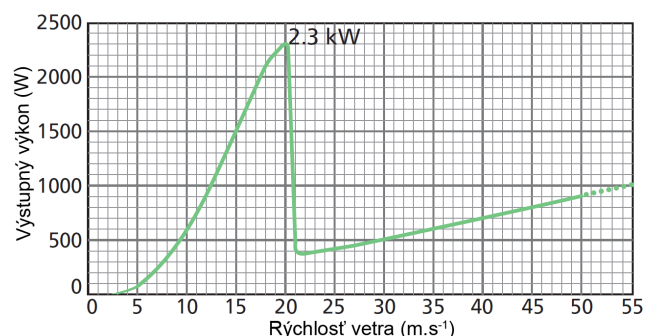
Typ veternej turbíny	Horizontálna os otáčania
Priemer rotoru	1800 mm
Hmotnosť	17,5kg
Počet lopatiek	3
Rozbehová rýchlosť (cut-in speed)	2,5 m.s ⁻¹
Rýchlosť pri ktorej sa turbína zastaví (cut-off speed)	-
Rýchlosť pri ktorej ešte nedôjde k poškodeniu (survival speed)	65 m.s ⁻¹
Nominálny výkon	1kW at 12,5 m.s ⁻¹
Nominálne otáčky rotoru	1000 ot.m ⁻¹
Maximálny výkon	2,3kW at 20 m.s ⁻¹

Technické údaje zvolenej veternej turbíny sú uvedené v Tab. 1. Menovitý výkon veternej turbíny je 1kW pri rýchlosti vetra 12,5 m.s⁻¹. Rozbehová rýchlosť danej turbíny je 2,5 m.s⁻¹.

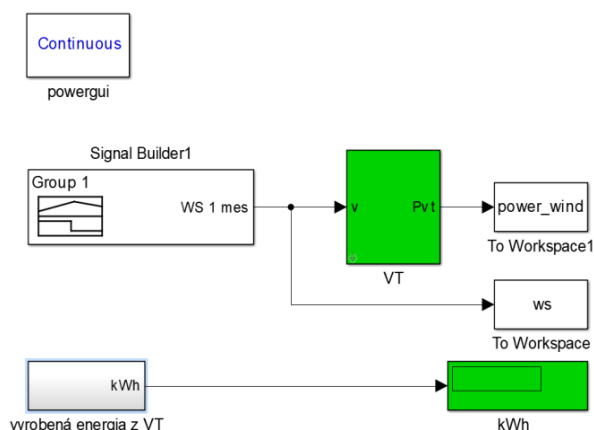
Výkonová charakteristika danej veternej turbíny je znázornená na Obr. 4. s maximálnym výkonom 2,3 kW, ktorú dosahuje pri rýchlosti vetra 20 m.s⁻¹.

IV. MODEL TURBÍNY V SIMULAČNOM PROGRAME

Veterná turbína je implementovaná v prostredí Matlab Simulink na základe výkonovej charakteristiky zobrazenej na Obr. 4. Rozbehová rýchlosť veternej turbíny je 2,5 m.s⁻¹ a maximálna prevádzková rýchlosť vetra je 65 m.s⁻¹, ktorá nie je v danej lokalite pre miestne klimatické podmienky bežná. Rýchlosť vetra pri, ktorej dôjde k zastaveniu turbíny z bezpečnostného dôvodu (cut-off speed), bola v simulácii uvažovaná rýchlosť 55 m.s⁻¹.



Obr. 4. Výkonová charakteristika veternej turbíny udávaná výrobcom [4].



Obr. 5. Implementácia modelu v prostredí Simulinku.

$$P(v) = \begin{cases} P = P_{0-2,5}; v < 2,5 m.s^{-1} & (4) \\ P = P_{2,5-20}; 2,5 m.s^{-1} \leq v < 21 m.s^{-1} & (5) \\ P = P_{21-55}; 21 m.s^{-1} \leq v < 55 m.s^{-1} & (6) \end{cases}$$

Pre rýchlosti vetra 0 - 2,5 m.s⁻¹ je výkon na základe obr. 4 definovaný ako 0W.

Preto pre (4) možno matematicky uviesť:

$$P_{0-2,5} = 0 W \quad (7)$$

Pre rýchlosti vetra 2,5 - 20 m.s⁻¹ je výkon na základe Obr. 4 definovaný ako aproximovaná krivka polynomicou rovnicou štvrtého rádu.

Preto pre (5) možno matematicky uviesť:

$$P_{2,5-20} = -0,04v^4 + 1,33v^3 - 5,69v^2 + 30,92v - 65,88 (W) \quad (8)$$

S presnosťou $R^2=0,99$

Pre rýchlosti vetra 21 - 55 m.s⁻¹ je výkon na základe obr. 4 definovaný ako aproximovaná krivka polynomicovou rovnicou štvrtého rádu.

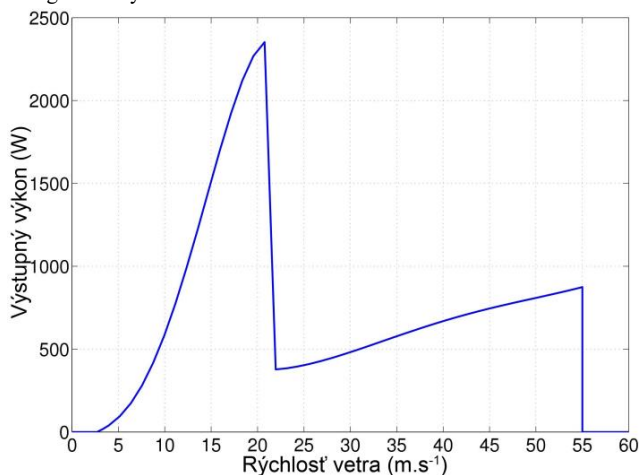
Preto pre (6) možno matematicky uviesť:

$$P_{21-55} = 0.0008v^4 - 0.1332v^3 + 7.9905v^2 - 187.79v + 1872.2 (W) \quad (9)$$

S presnosťou R²=0,96

Pre rýchlosti vetra 55 - ∞ m.s⁻¹ je výstupný výkon nastavený na 0 W.

Na Obr. 5 je možné vidieť finálny pohľad na implementovaný model v prostredí Matlab Simulink. Vstupný parameter v modeli je rýchlosť vetra v (m.s⁻¹). Na výstupe je výkon generovaný turbínou v wattoch. Model tiež vypočítava vyrobenú elektrickú energiu v kWh integráciou výkonu v čase.

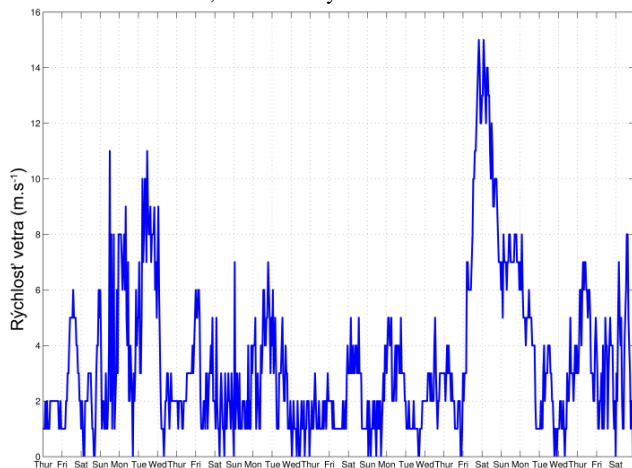


Obr. 6. Implementácia výkonovej charakteristiky v prostredí Simulinku.

Výsledná výkonová charakteristika veternej turbíny založenej na (7), (8) a (9) je zobrazená na Obr. 6.

V. SIMULÁCIE

Simulácia prebiehala v continuous móde s nastaveným solverom ode45, ktorý je schopný riešiť nonstifové diferenciálne rovnice - metódu stredného rádu, so simulačným krokom 1s.

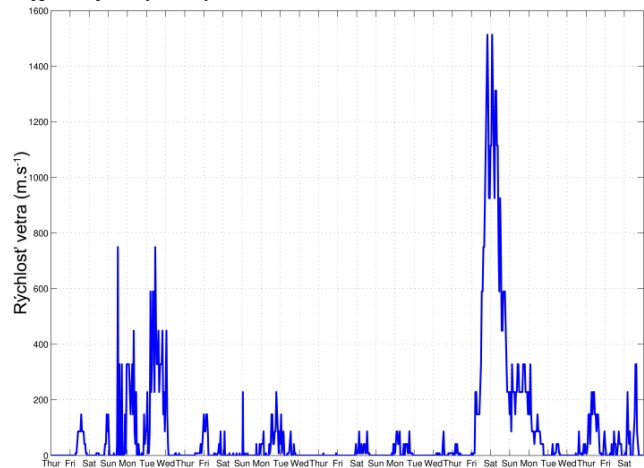


Obr. 7. Časový priebeh meranej rýchlosti vetra za mesiac január 2015.

Vstupným parametrom boli hodnoty rýchlosti vetra merané na Katedre elektroenergetiky za obdobie jedného kalendárneho mesiaca. Konkrétne bol vybraný mesiac január 2015 s priemernou rýchlosťou vetra 3,176 m.s⁻¹. Časový priebeh meranej rýchlosti vetra je znázornený na Obr. 7. Na základe výpočtu realizovaného modelom,

daná veterná turbína vyrobila 62,12 kWh elektrickej energie (pozri Obr. 5).

Vzorkovací čas pri meraní bol 3600s (1h), preto ho bolo nutné pred importom dát do Matlabu upraviť na 1s. Keďže v Matlabe je simulačný krok na úrovni 1s, vhodnejší čas vzorky merania rýchlosti vetra by bol 1s, tak aby sa z výsledkou simulácie získali čo najpresnejšie výsledky.



Obr. 8. Časový priebeh vypočítaného výkonu veternej turbíny za mesiac január 2015.

Na Obr. 8 je znázornený časový priebeh vypočítaného výkonu veternej turbíny za mesiac január 2015. Špičky rýchlosti vetra zo dňa 22. a 23. (Obr. 7.), korešpondujú so špičkami produkovaného výkonu veternou turbínou 22. a 23. januárom roku 2015 (Obr. 8).

ZÁVER

V súčasnosti je možné zaznamenať rastúci záujem o praktické využitie obnoviteľných zdrojov energie na celom svete. Keďže najbežnejšími typmi týchto zdrojov energie sú fotovoltaické panely a veterné turbíny. Rozhodli sme sa preskúmať možnosť výroby elektrickej energie z vetra v miestnych podmienkach.

Hlavným cieľom tohto článku bolo preskúmať teoretický základ malých veterných turbín používaných napr. v domácnostiach a vytvoriť počítačovú simuláciu jednej špecifickej výroby elektrickej energie z veternej turbíny. Pretože väčšina veterných turbín vysokú rozbehovú rýchlosť vetra, bola zvolená turbína s najnižšou možnou rozbehovou rýchlosťou.

Táto charakteristika výkonu turbíny poskytovaná výrobcami bola úspešne implementovaná do prostredia Matlab Simulink s pomocou polynomickej aproximácie, kde sme špecifikovali 2 stupne s matematickými rovnicami a 2 cez konštantnú hodnotu 0 W. Zostavený model dynamicky vypočítava výkon veternej turbíny na základe rýchlosti vetra na vstupe. Tento modelovací prístup by bolo zaujímavé overiť s meraním na reálnej veternej turbíne a dátami o rýchlosti vetra so vzorkovacou frekvenciou 1 s.

Na základe získaných výsledkov v kapitole V. je možné konštatovať, že by takáto veterná turbína v miestnych podmienkach nemala zmysel. Vyrobená elektrická energia nebola dostatočná na to, aby odôvodnila nákupné náklady. Cena takejto turbíny je okolo 3600 €. Za zlomok ceny je možné kúpiť podobné veterné turbíny z Číny, avšak s pochybnou životnosťou a spoľahlivosťou. Za túto cenu by bolo v našich podmienkach oveľa rozumnejšie investovať finančné prostriedky do fotovoltaických panelov. Za obstarávaciu cenu danej turbíny by bolo možné zakúpiť približne 18 fotovoltaických panelov

a vyrábať väčšie množstvá elektrickej energie bez škodlivých emisií CO₂. Popri prípade zakúpiť menšie množstvo panelov a investovať finančné prostriedky do akumuláčnych zariadení ako sú napr. elektrochemické akumulátory.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0372/18.

LITERATÚRA

- [1] Wind EUROPE: Wind energy in Europe in 2018, p. 11 [Online]. Available at: <<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf>> Accessed on March 10, 2019
- [2] V. Quasching, "Understanding Renewable Energy Systems," 1st edition, Earthscan: London 2005, ISBN 1-84407-128-6, p. 19.
- [3] P. Mastný, "Obnoviteľné zdroje elektrickej energie" České vysoké učení technické v Praze. Praha: 2011. ISBN 978-80-01-04937-2, p. 37.
- [4] Manualslib: Zephyr Airdolphin Pro Z-1000 - 48 Instruction Manual [Online]. Available at: <<https://www.manualslib.com/manual/846818/Zephyr-Airdolphin-Pro-Z-1000-48.html>> Accessed on March 10, 2019
- [5] e-Marine-Systems: Airdolphin 48V Pro Brochure [Online]. Available at: <<http://www.emarineinc.com/pdf/WGZ30048.pdf>> Accessed on March 10, 2019

ADRESY AUTOROV

Jakub Urbanský, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 040 01, Slovenská Republika, Jakub.Urbansky@tuke.sk

Lubomír Beňa, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 040 01, Slovenská Republika, Lubomir.Bena@tuke.sk

Daniel Pál, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Daniel.Pal@tuke.sk

Michal Ivančák, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 040 01, Slovenská Republika, Michal.Ivancak@tuke.sk

Michal Márton, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroniky a multimediálnych komunikácií, Boženy Němcovej 32, Košice, SK 040 01, Slovenská Republika, Michal.Marton@tuke.sk

O AUTOROCH

Jakub URBANSKÝ narodený v roku 1991. V roku 2017 absolvoval štúdium na Katedre elektroenergetiky na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. V súčasnosti je Ph.D. študent na Katedre elektroenergetiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Inžiniersky titul získal v odbore elektroenergetika na tému „Možnosti napojenia elektromobilov na inteligentný dom“. Jeho výskum je zameraný najmä na oblasť obnoviteľných zdrojov.

Lubomír BEŇA narodený v roku 1975. V roku 1998 absolvoval vysokoškolské štúdium na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Kandidátsku dizertačnú prácu obhájil v roku 2002. V súčasnosti pôsobí ako docent na Katedre elektroenergetiky FEI TU v Košiciach. Vo svojej pedagogickej a odbornej činnosti sa orientuje na oblasť prenosu a rozvodu elektrickej energie, riadenia a optimalizácie prevádzky elektrizačných sústav a počítačovej analýze elektrických sietí.

Daniel PÁL narodený v roku 1994. V roku 2018 absolvoval štúdium na Katedre elektroenergetiky na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. V súčasnosti je Ph.D. študent na Katedre elektroenergetiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Inžiniersky titul získal v odbore elektroenergetika na tému „Návrh rekonštrukcie osvetlenia školských priestorov“. Jeho výskum je zameraný najmä na oblasť obnoviteľných zdrojov.

Michal IVANČÁK narodený v roku 1993. V roku 2016 absolvoval štúdium na Katedre elektroenergetiky na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. V súčasnosti je Ph.D. študent na Katedre elektroenergetiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Inžiniersky titul získal v odbore elektroenergetika na tému „Analýza selektivity vlastnej spotreby elektrárne“. Jeho výskum je zameraný najmä na oblasť obnoviteľných zdrojov a inteligentných sietí.

Michal MÁRTON narodený v roku 1992. V roku 2016 absolvoval štúdium na Katedre elektroniky a multimediálnych komunikácií. V súčasnosti je Ph.D. študent na Katedre elektroniky a multimediálnych komunikácií na Fakulte elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Inžiniersky titul získal v odbore elektrotechnika na tému „Meranie s optickým vláknovým gyroskopickým systémom“. Jeho vedecký výskum je zameraný hlavne na výskum optických komunikácií.