

Dvostopenjska vetrna turbina

Vlado SCHWEIGER, Brane ŠIROK

Izveček: V prispevku je predstavljen pristop k povečanju izrabe energije vetra z uvedbo dvostopenjske nasproti se vrteče vetrne turbine. Teoretični aerodinamični izkoristek, poznan kot Betzova limita, se pri tem poveča z 0,593 na 0,64. V nadaljevanju so predstavljeni rezultati eksperimenta za enojno in dvostopenjsko nasproti se vrtečo izvedbo vetrne turbine. Rezultati kažejo na povečanje izkoristka energije iz razpoložljive energije vetra.

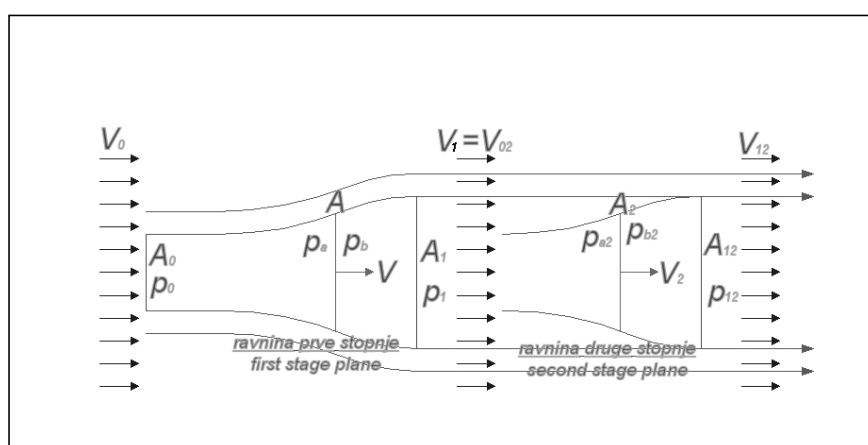
Ključne besede: energija vetra, dvostopenjska turbina, Betzova limita, integralne karakteristike

1 Uvod

Izkoriščanje vetrne energije sega približno 3000 let v zgodovino. Do začetka sodobne industrializacije je predstavljala kinetična energija vetra poleg potencialne energije vode pomemben vir mehanskega dela. S pričetkom izrabljanja fosilnih goriv, ki predstavljajo stalnejši vir energije, je začel veter izgubljati na pomenu. Ob izbruhu energetske krize v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja pa se je začel ponoven vzpon izkoriščanja energije vetra. Proizvodnja električne energije iz kinetične energije vetra se je v zadnjem desetletju podvojila vsaka leta.

Znano je, da lahko kinetično energijo vetra, ki prehaja skozi vetrno turbino, izkoristimo le z 59,3 -odstotnim izkoristkom. Ta izkoristek, imenovan tudi aerodinamični izkoristek vetrne turbine ali Betzova limita, je teoretična zgornja meja energijske pretvorbe. Z uvedbo druge stopnje vetrne turbine želimo izkoristiti preostalo kinetično energijo vetra, ki je prva stopnja turbine ne pretvori. Izračun dvostopenjske vetrne turbine je predstavljen v literaturi [2], pri tem se teoretični aerodinamični izkoristek poveča na 64%. Z nadaljnjim povečevanjem števila stopenj se

Vlado Schweiger, univ. dipl. inž., Hidria Inštitut Klima, Godovič;
Prof. dr. Brane Širok, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 1. Model dvostopenjske vetrne turbine

približujemo limitni vrednosti. Pri neskončnem številu stopenj znaša teoretični izkoristek 66% [3].

2 Enodimenzijski model dvostopenjske vetrne turbine

Model enostopenjske horizontalne vetrne turbine propellerskega tipa je bil izdelan na začetku 20. stoletja [5], dvostopenjska vetrna turbina pa je bila matematično opisana v delih [2] in [3].

Oba modela sta enodimenzijska in temeljita na naslednjih predpostavkah:

- tok je idealen in nestisljiv,
- hitrost vetra je stacionarna in homogena,
- hitrostno polje je v ravnini preseka vetrne turbine uniformno,
- ni tokovnih motenj pred vetrno turbino in za njo,
- ni rotacije toka zaradi vrtenja vetrne turbine,

- rotacija same vetrne turbine ni upoštevana,
- pri dvostopenjski vetrni turbini ni upoštevan vpliv medsebojne oddaljenosti obeh stopenj.

Pri enostopenjski vetrni turbini je optimalna hitrost za turbino enaka tretjini hitrosti pred njo. To pomeni, da je na razpolago še nekaj kinetične energije vetra, ki bi jo bilo mogoče izkoristiti v nadaljnji stopnji. Druga turbinska stopnja je postavljena v osi za prvo, vendar oddaljena toliko, da je tok zraka v drugo stopnjo nemoten, kot je prikazano na sliki 1. Velikost druge stopnje vetrne turbine je enaka prvi stopnji, kar v splošnem ni nujno.

Analizo dvostopenjske vetrne turbine lahko obravnavamo z metodo superpozicije. Model delimo na dva dela in ju obravnavamo ločeno, na koncu pa zopet združimo.

Namišljena tokovna cev se razširi od vstopa proti izstopu. Ta razširitev je posledica ohranjanja masnega toka skozi vetrno turbino:

$$\rho A_0 v_0 = \rho A v = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 \quad (1)$$

Na lopaticah prve stopnje vetrne turbine se kinetična energija zraka pretvori v mehansko delo, hitrost zraka pa se pri tem zmanjša od v_0 na v . Sprememba hitrosti je podana s hitrostnim faktorjem a :

$$a = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (2)$$

Pri dovolj veliki oddaljenosti med stopnjama je izstopna hitrost zraka iz prve stopnje enaka vstopni hitrosti v drugo stopnjo:

$$v_1 = v_{02} = v_0(1 - 2a) \quad (3)$$

Hitrost v ravnini druge stopnje vetrne turbine se zmanjša za hitrostni faktor b , ki v splošnem ni enak hitrostnemu faktorju a prve stopnje:

$$b = \frac{v_{02} - v_2}{v_{02}} \quad (4)$$

ali v urejeni obliki:

$$v_2 = v_{02}(1 - b) \quad (5)$$

Hitrost za drugo stopnjo vetrne turbine je tako:

$$v_{12} = v_{02}(1 - 2b) \quad (6)$$

Skupni aerodinamični izkoristek dvostopenjske vetrne turbine je podan z enačbo [8]:

$$\eta_{Vtot}(a, b) = \frac{1}{(A, A_2)_{\max}} = \left[4Aa(1-a)^2 + 4A_2(1-2a)^3 b(1-b)^3 \right] \quad (7)$$

Enačba (7) je zvezna dvoparametrična funkcija. Za izračun optimuma funkcije je potrebno izračunati odvod funkcije po obeh spremenljivkah, tako po hitrostnem faktorju a kot hitrostnem faktorju b .

$$\frac{\partial \eta_{Vtot}(a, b)}{\partial a} = \frac{4A}{(A, A_2)_{\max}} \left[(1-a)^2 - 2a(1-a)^2 \right] - \frac{24A_2(1-b)^2}{(A, A_2)_{\max}} (1-2a)^3 \quad (8)$$

ter

$$\frac{\partial \eta_{Vtot}(a, b)}{\partial b} = \frac{4A_2}{(A, A_2)_{\max}} (1-2a)^3 \left[(1-b)^2 - 2b(1-b) \right] \quad (9)$$

Ob upoštevanju $A = A_2$ in izenačitvi odvodov z nič preideta enačbi (9) in (8) v obliko:

$$\frac{\partial \eta_{Vtot}(a, b)}{\partial a} = 4(1-a)^2 - 8a(1-a)^2 - 24(1-b)^2(1-2a)^3 = 0 \quad (10)$$

ter

$$\frac{\partial \eta_{Vtot}(a, b)}{\partial b} = 4(1-2a)^3 \left[(1-b)^2 - 2b(1-b) \right] = 0 \quad (11)$$

Rešitev enačb (10) in (11) nam da optimalni vrednosti hitrostnih faktorjev:

$$a_{opt} = \frac{1}{5} \text{ ter } b_{opt} = \frac{1}{3} \quad (12)$$

Pri optimalnih vrednostih obeh faktorjev doseže izkoristek dvostopenjske vetrne turbine po enačbi (7) največjo vrednost:

$$\eta_{Vopt}\left(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{25} = 0,64 \quad (13)$$

Enodimenzijska modela za eno- in dvostopenjsko vetrno turbino dasta informacijo o hitrosti za posamezni vetrnici. V primeru enostopenjske turbine znaša hitrost za vetrno turbino po enačbi (7) v optimalni točki

$\frac{1}{5}$ vstopne hitrosti v_0 . V primeru dvostopenjske vetrne turbine, kjer je dobljena večja teoretična moč vetrne turbine ter s tem večji aerodinamični izkoristek, pa mora biti hitrost v delu za drugo stopnjo še nekoliko manjša. S kombinacijo enačb (3), (5) ter (12) dobimo hitrost za drugo stopnjo dvostopenjske vetrne turbine v optimalni točki, ki znaša $\frac{1}{5}$ vstopne hitrosti v_0 .

3 Eksperimentalna analiza eno- in dvostopenjske vetrne turbine

Eksperimentalna analiza je zajemala meritev integralnih karakteristik eno- in dvostopenjske vetrne turbine. Cilj eksperimenta je bil meritev vrtilnega momenta na gredi, ki ga ob dani hitrosti vetra generira vetrna turbina. Poleg momenta je bila izmerjena tudi vrtilna frekvenca vetrne turbine, kar je omogočalo oceno energijske pretvorbe.

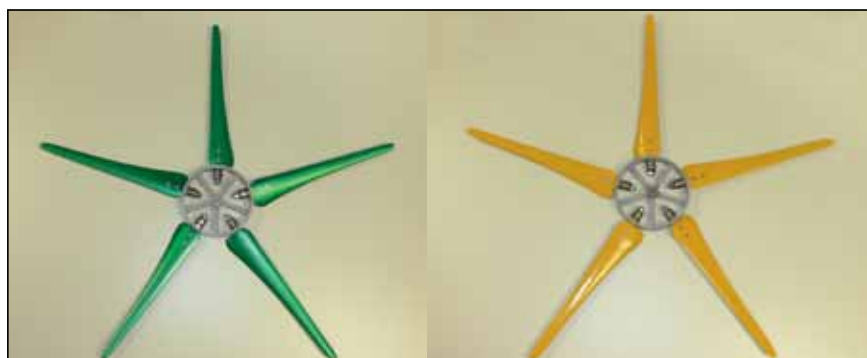
Pri dvostopenjski vetrni turbini je bila v okviru meritev integralnih karakteristik izvedena še parametrična analiza razdalje med posameznima stopnjama in njen vpliv na karakteristiko turbine. Po navedbah [4] naj bi se v primeru dvostopenjske vetrne turbine povečala zagonski moment in vrtilna frekvenca.

3.1 Opis merjene vetrne turbine

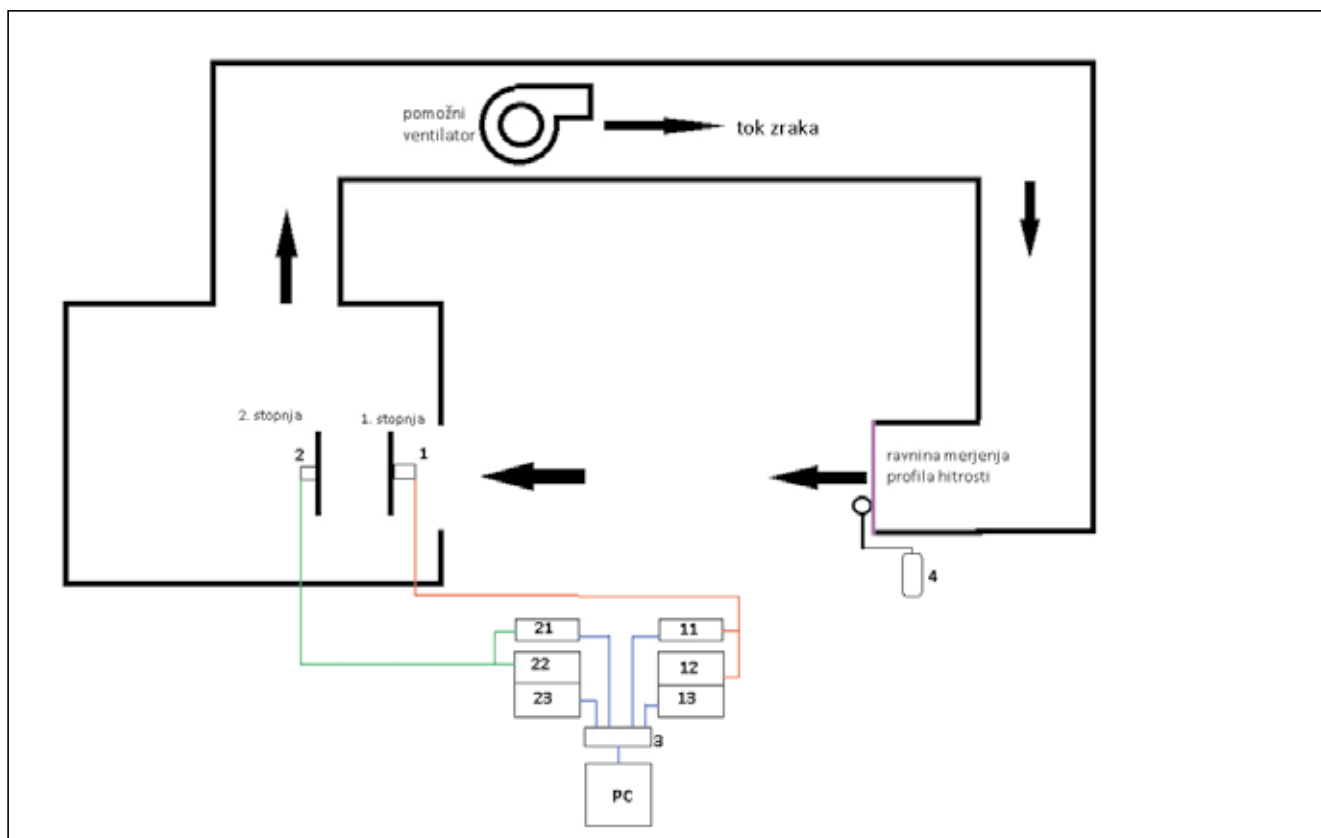
Analizirana je bila 5-kraka vetrna turbina, katere vetrnici premera $D = 800$ mm sta prikazani na sliki 2. V prvem približku so krila druge stopnje zrcalna krila prve stopnje. Vetrna turbina je projektirana za razmernik hitrosti $\lambda = 6$, kjer je razmernik

določen z izrazom $\lambda = \frac{\Omega r}{V_0}$, ki zajema vrtilno hitrost, premer vetrne turbine ter hitrost vetra.

Pri konstantnih integralnih aerodinamskih pogojih, ki so bili nastavljeni z vrtilno frekvenco pogonskega ventilatorja in merjeni z anemometrom, so bile izvedene meritve momentov in vrtilne frekvence



Slika 2. Sestavljena rotorja vetrne turbine, levo prva, desno druga stopnja



Slika 3. Shema predelane merilne proge, Hidria Inštitut Klima

na obeh vetrnicah dvostopenjske turbine. Momenta sta bila določena posredno preko umeritvenih karakteristik instaliranih električnih motorjev. Merilna negotovost pri merjenju momentov na posameznih vetrnicah znaša $\pm 1\%$.

Na sliki 3 je shematsko prikazana

merilna proga, na kateri so bile merjene aerodinamske karakteristike vetrne turbine. 1 in 2 sta zavori vetrnih turbin. 4 predstavlja krilni anemometer MiniAir20 - Schiltknecht, s katerim je bil pomerjen profil hitrosti na izstopni cevi merilne postaje v skladu s standardom ISO 5801.

Meritve aerodinamičnih karakteristik

vetrne turbine pa so bile izvedene na merilni progi za merjenje integralnih karakteristik ventilatorjev v Hidria Inštitutu Klima. Merilna proga je narejena po standardu ISO 5801:1997. Shema merilne proge je prikazana na sliki 3. Skupna merilna negotovost določanja integralne hitrosti v vstopni ravnini pred prvo vetrnico je bila ocenjena na osnovi predhodnih študij pogreškov posameznih zaznaval in elementov pretočnega trakta merilne proge in znaša $\pm 1,8\%$.

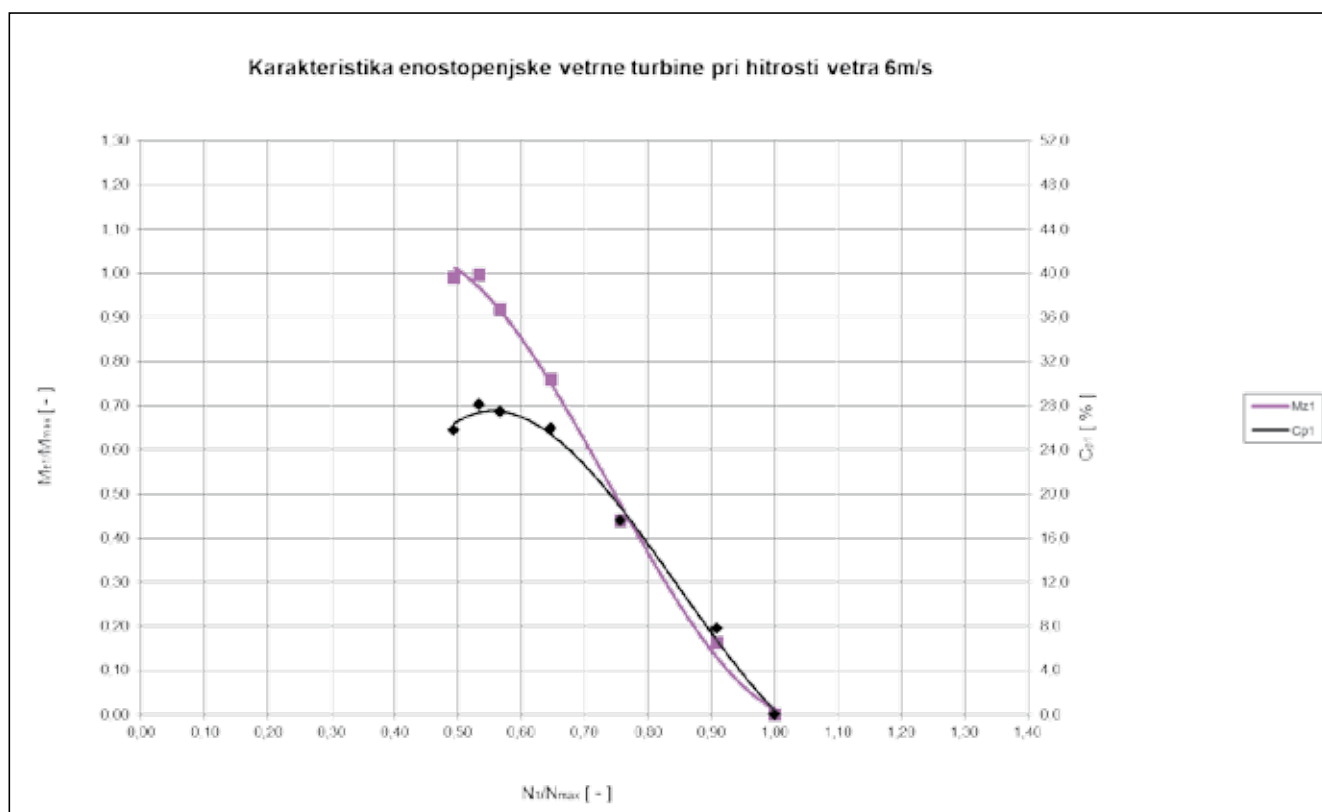
Na sliki 4 je prikazana dvostopenjska vetrna turbina v obratovanju. Oba med seboj ločena in soosno postavljena elektromotorja – zavori, na katerih sta vetrnici, sta pritrjena na fiksne konzole, ki omogočajo zvezno spreminjanje razdalje med nasproti vrtečima se rotorjema.

3.2 Opis eksperimenta

Za vsak λ ima vetrna turbina optimalno obratovalno točko, kar pomeni, da je maksimalen koeficient moči le pri določeni vrtilni frekvenci pri danem premeru vetrne turbine.



Slika 4. Vetrna turbina – postavitev



Slika 5. Karakteristika enostopenjske vetrne turbine

Ob povečanju hitrosti vetra se P_0 , ki predstavlja razpoložljivo energijo vetra, povečuje. Pri tem je zaželeno, da se vrtilna frekvenca vetrne turbine prav tako poveča. Na ta način se

ohranja maksimalen koeficient moči

$C_p = \frac{P}{P_0}$, kjer P predstavlja moč na gredi elektromotorja – zavore. Pri izbrani konstantni hitrosti vetra lahko obremenitev vetrne turbine povečujemo do točke maksimalnega koeficienta moči. Če obremenitev še povečamo, se vrtilna frekvenca vetrnice zmanjša do ustavitve, saj generirani moment na vetrnici ne more premagati električnega bremena na elektromotorju – zavori.

Ob samem zagonu pri neki hitrosti vetra vetrna turbina preide čez točko maksimalnega koeficienta moči in se ustali v neki točki glede na obremenitev. Ta podatek je pomemben za samo izvedbo meritev, saj karakteristiko lahko pomerimo samo v področju desno od maksimalnega koeficienta moči.

Na osnovi teoretičnih izhodišč, dizajnirane geometrije ter možnosti

izvedbe meritev na merilni progi v Hidrii Inštitutu Klimi so bile meritve eno- in dvostopenjske vetrne turbine izvedene pri konstantni hitrosti vetra $V_0 = 6 \text{ m/s}$.

V drugem delu so bile izvedene meritve aerodinamske karakteristike enojne vetrne turbine, ki je predstavljala referenco za nadaljnjo študijo dvostopenjske vetrne turbine. Pri dani hitrosti vetra je bilo spreminjano električno breme na elektromotorju – zavori, na katero je bil pritrdjen rotor vetrne turbine. Ob vsaki spremembi obremenitve je bil zabeležen podatek o obremenitvi ter vrtilni frekvenci vetrne turbine. Obremenitev je bila povečana do točke maksimalnega momenta, ki ga je uspela vetrna turbina generirati pri nastavljeni hitrosti vetra.

Zadnji del meritev zajema meritve dvostopenjske vetrne turbine, ravno tako pri konstantni hitrosti vetra. V tem primeru je raziskan vpliv medstopenjske razdalje.

Medstopenjska razdalja, l_s , je bil normirana glede na premer vetrne turbine: $0,125 < l_s/D < 0,75$. Ravno tako so

normirani rezultati meritev, in sicer je zaviralni moment normiran glede na maksimalni pomerjeni moment, $\frac{M_{z1}}{M_{z \max}}$, in vrtilna frekvenca vetrne turbine, $\frac{N_1}{N_{\max}}$. Moč, ki jo vetrna tur-

bina generira, pa je izračunana po enačbi:

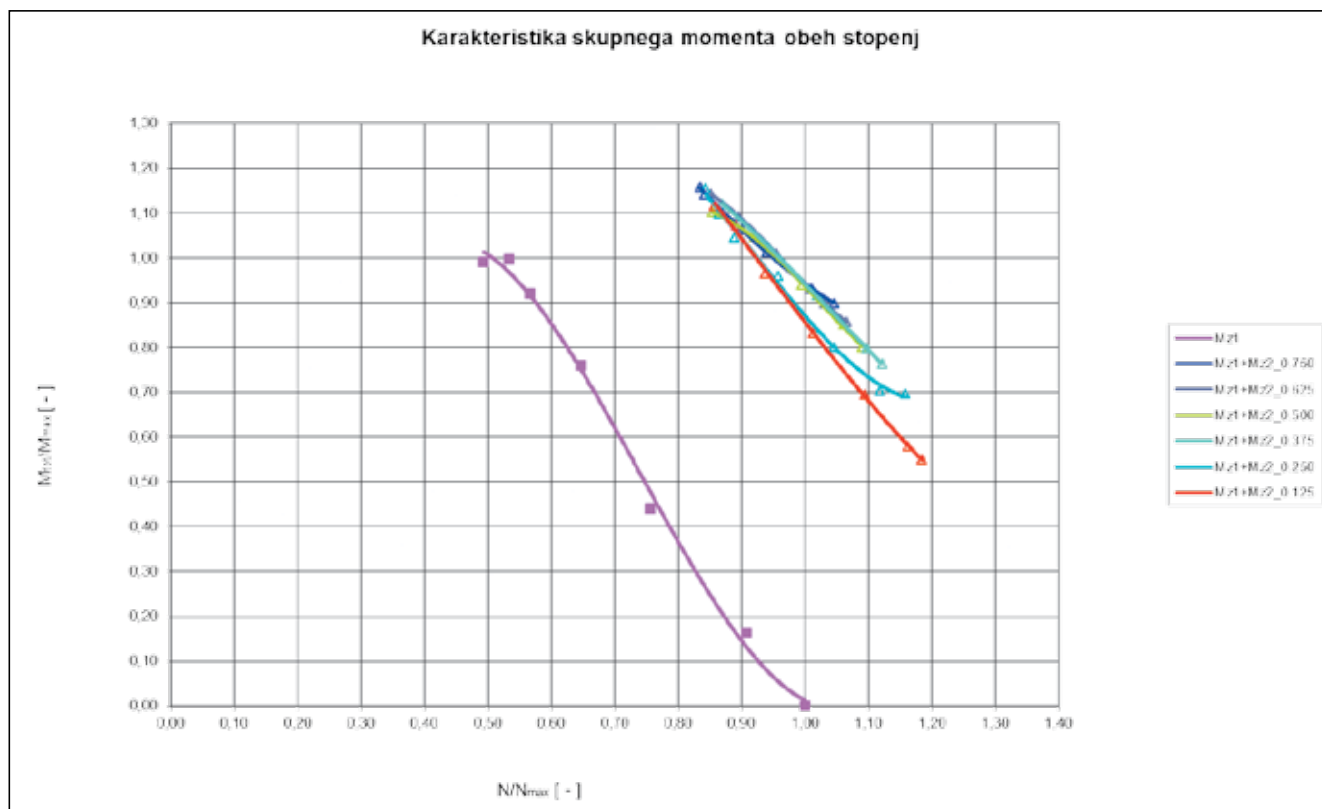
$$P_{z1} = M_{z1} \Omega = M_{z1} \pi \frac{N}{30} \quad (14)$$

Najprej je bila pomerjena enostopenjska izvedba vetrne turbine, sledila je meritev dvostopenjske izvedbe. Pri dvostopenjski izvedbi je bil za vsako medstopenjsko razdaljo poiskan lokalni maksimum momenta na gredi turbine.

4 Rezultati

Aerodinamska karakteristika enostopenjske vetrne turbine je prikazana na sliki 5.

Aerodinamska karakteristika enostopenjske vetrne turbine je služila kot osnova za nadaljnje analize dvostopenjske vetrne turbine. Prikazani sta normirana karakteristika momenta in karakteristika koeficienta moči.



Slika 6. Karakteristika skupnega momenta obeh stopenj

Maksimalni koeficient moči je dosežen nekoliko nižje od točke maksimalnega momenta, ki ga vetrna turbina lahko generira pri dani hitrosti vetra. Leve strani ni mogoče pomeriti, saj s povečanjem zaviralnega momenta zavore vetrno turbino ustavimo.

4.1 Dvostopenjska izvedba

Pri dvostopenjski vetrni turbini se druga stopnja vrti v nasprotno smer kot prva. Tako se momenta obeh stopenj seštevata, enako velja tudi za vrtilni frekvenci. Karakteristika momenta je prikazana na *sliki 6*, koeficienta moči na *sliki 7*.

Na *sliki 6* je prikazana karakteristika dvostopenjske vetrne turbine, ko sta obremenjeni obe stopnji, ob različnih medstopenjskih razdaljah. Skupni moment je primerjan z momentom enostopenjske izvedbe. Iz diagrama sledi, da se maksimalni moment poveča za 15 %, pri čemer se relativna vrtilna frekvenca poveča za 66 % v točki maksimalnega momenta. Ne glede na medstopenjsko razdaljo so krivulje skupnega momenta dvostopenjske vetrne turbine

zelo skupaj. Lahko bi zaključili, da medstopenjska razdalja nima signifikantnega vpliva na skupni moment.

Na *sliki 7* je prikazana karakteristika skupnega koeficienta moči dvostopenjske vetrne turbine v primerjavi z enostopenjsko izvedbo. Razvidno je, da ne pride do bistvenega povečanja koeficienta moči. V primeru, ko je medstopenjska razdalja manjša od $\frac{D}{4}$, je koeficient moči celo manjši, kot ga ima enostopenjska izvedba. Pozitiven učinek druge stopnje pa se pokaže pri medstopenjski razdalji, večji od $\frac{D}{4}$, kjer je zabeleženo povečanje koeficienta moči za 1,5 %.

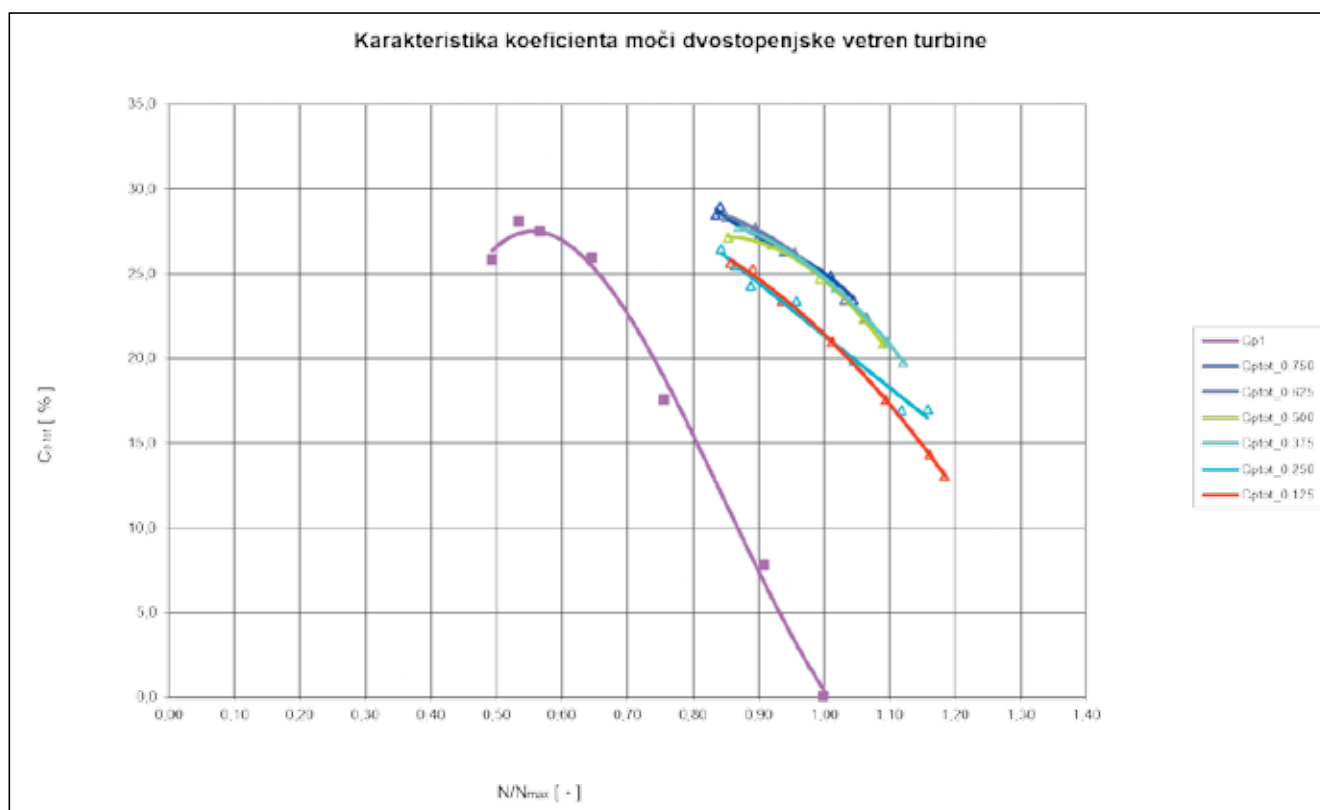
5 Zaključek

Obravnavani sta bili enostopenjska in dvostopenjska vetrna turbina. Prikazan je bil teoretični enodimenzijski model za dvostopenjsko vetrno turbino. Eksperimentalno je bila določena integralna karakteristika eno- in dvostopenjske vetrne turbine. Pri enostopenjski turbini je bil pomeren maksimalni koeficient moči 28 %. Sledil je test dvosto-

penjske vetrne turbine, in sicer pri različnih medstopenjskih razdaljah. V [4] je predstavljen podoben eksperiment, kjer ne poročajo o višjem momentu in višjem koeficientu moči. Ugotovljeno je, da medstopenjska razdalja negativno vpliva na koeficient moči pri vrednostih $l_s < 0,25D$. Pri dvostopenjski izvedbi pride do relativnega povečanja momenta, in sicer za 15 %.

Viri

- [1] Thomas Ackerman, Lennart Soder, An Overview of Wind Energy Status 2002, Renewable & Sustainable Energy Reviews, p. 67–128, June 2002.
- [2] B. G. Neman, Actuator-Disc Theory For Vertical-Axis Wind Turbine, Journal of Wind Energy And Industrial Aerodynamics, Volume 15, Issue 1–3, p. 347–355, December 1983.
- [3] B. G. Neman, Multiple Actuator-Disc Theory For Wind Turbines, Journal of Wind Energy And Industrial Aerodynamics, Volume 24, Issue 3, p. 347–355, October 1986.



Slika 7. Karakteristika skupnega koeficienta moči obeh stopenj

- [4] Izumi Ushiyama, Toshihiko Shimota, Yukihiro Miura, An Experimental Study of The Two Staged Wind Turbines, Renewable Energy, Volume 9, Issue 1–4, p. 909–912, September–December 1996.
- [5] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, WIND ENERGY (handbook), John Wiley & Sons Ltd, England, reprinted 2001.
- [6] Leopold Škerget, Mehanika tekočin, Univerza v Mariboru in Univerza v Ljubljani, Tehniška fakulteta Maribor in Fakulteta za strojništvo Ljubljana, Ljubljana 1994.
- [7] Irving H. Shames, Mechanics of Fluids Third Edition, McGraw-Hill Inc., ZDA, International Edition 1992.
- [8] V. Schweiger, B. Širok, N. Mihelič, M. Tuma, Dvostopenjska vetrna turbina, Strojniški vestnik, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2005, letnik 51, št. 3.

Two-Stage Wind Turbine

Abstract: Paper presents an approach to increasing utilization of wind energy by introducing a two-stage opposite rotating wind turbine. Theoretical aerodynamic efficiency, known as Betz limit, is increased from 0,593 to 0,64. The experimental results for a single and two-stage wind turbine are compared. The results suggest an increase in wind turbine energy from the available wind energy.

Keywords: wind energy, two-stage turbine, Betz limit, Integral characteristics



Mednarodni strokovni sejem za industrijsko in profesionalno elektroniko
International Trade Fair for industrial and professional electronic

Slovenija, Celje, 25. - 27. 01. 2012

www.intronika.si

SRPARNI SPONZOR



SENSOR INTELLIGENCE

