

Potrošnja topotne eksergije dovedene gorivom znatno je veća u procesu sa plamenom peći u odnosu na proces Outkumpu ( $47,25 \cdot 10^3 \frac{kJ}{d} > 24,76 \cdot 10^3 \frac{kJ}{d}$ , tj. za oko 90%)[5]

Eksergija korisnog produkta u Outkumpu procesu nešto je veća u odnosu na proces sa plamenom peći ( $678 \cdot 10^3 \frac{kWh}{d} > 632,4 \cdot 10^3 \frac{kWh}{d}$ ) [5]. Ovo povećanje ostvareno je zbog povećane količine sumporne kiseline u Outkumpu procesu u odnosu na proces sa plamenom peći. Međutim, eksergija proizvedene električne energije je manja u Outkumpu procesu ( $42 \cdot 10^3 \frac{kWh}{d} < 60,6 \cdot 10^3 \frac{kWh}{d}$ ) [5]. Ovo nastupa iz razloga toga što se upotreboom tehničkog kiseonika smanjuje količina otpadnog gasa usled čega se smanjuje i raspoloživa otpadna toplota. To istovremeno znači da se procenat  $\text{SO}_2$  u otpadnom gasu povećava, pa je zato i veća proizvodnja sumporne kiseline kao korisnog produkta.

Interesantno je, poređenja radi da se dobijaju sledeće vrednosti za eksertske stepene korisnosti kada se u oba slučaja ne proizvodi sumporna kiselina, tj. kada bi se otpadni gas istakao u atmosferu:

- za tehnologiju sa plamenom peći:  $\eta_{ex} = 0,06$ ,  $\eta_{ex}^{(1)} = 0,06$

- za tehnologiju sa Flash postupkom bilo bi:  $\eta_{ex} = 0,07$

Ovaj poslednji stav ukazuje da se takva tehnologija ne sme primeniti iz dva razloga: prvi, jer bi ispuštanje takvog gasa u atmosferu izazvalo ekološke probleme, i drugi, jer se radi o nižoj energetskoj efikasnosti takve tehnologije.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize rezultata dobijenih istraživanjem po eksertskoj metodi može se reći da je proces dobijanja katodnog bakra po Outkumpu tehnologiji znatno povoljniji u odnosu na tehnologiju sa plamenom peći. Takođe, Outkumpu proces doprinosi i smanjenju zagadenja vazduha, što doprinosi ekološkoj zaštiti okoline i životne sredine.

Prema tome, u procesu dobijanja katodnog bakra treba koristiti pre Outkumpu procese, tj. procese sa topljenjem u lebdećem stanju u odnosu na procese sa plamenom peći.

## LITERATURA

- [1] B.C. Степанов, Т.Б. Степанова, Экономика управления производством, Cvetne metally, № 4, 1978, s. 80,81.
- [2] R.Stolić,Mogućnosti korišćenja otpadne toplote pri dobijanju bakra, Magistarski rad, Mašinski fakultet u Beogradu, 1979. god., str 112,113.
- [3] D.A. Schultz; Pollution control and energy consumption at U.S. copper smelters, J. Metals, january 1978., pg: 16,17.
- [4] J. Szargut, Energetika cieplna w hutnictwie, Śląsk Katowice, s. 632-643
- [5] R. Stolić, D. Mišić, A. Milosavljević, M. Strak, Exergy Analysis of Copper Production Process from Sulphide Concentrates, Heavy Machinery HM 2002, Kraljevo, pg. B.17

## NUMERIČKI ALGORITAM ZA PRORAČUN AEROTURBINA MALE SNAGE

Nebojša Jovičić<sup>1</sup>, Dušan Gordić<sup>2</sup>, Milun Babić<sup>2</sup>, Vanja Šušteršić<sup>2</sup>

**Rezime:** U radu je prikazan razvijeni algoritam za proračun glavnih dimenzija osnovnohorizontalne aeroturbine male snage. Matematički model se sastoji od dve celine. Prva obuhvata određivanje osnovnih dimenzija radnog kola aeroturbine, dok druga celina obuhvata određivanje uglova postavljanja profila. Na osnovu matematičkog modela razvijen je softver za proračun i prikazana je njegova primena na primeru aeroturbine snage 5 kW. U radu je prikazano i konceptualno rešenje geometrijskog 3D modela lopatice aeroturbine primenom CATIA i Excel softverskih paketa.

**Ključne reči:** osnovnohorizontalna aeroturbina, metod uzgonskih površina, CAD

## NUMERICAL ALGORITHM FOR DESIGN OF A SMALL WIND TURBINE

**Abstract:** In this paper, developed numerical algorithm for calculation of the mean HAWT (horizontal-axis wind turbine) dimensions is presented. Mathematical model consists of two parts. The first part includes calculation of the impeller mean dimensions, while the second part involves the blade pitch angles design. Based on the mathematical model, software is developed and applied for calculation and design of the small 5 kW wind turbine. Also, 3D model of wind turbine blade is modeled by using CATIA and Excel software.

**Keywords:** horizontal-axis wind turbine, Method of lifting surfaces, CAD

## 1. UVOD

Obnovljivi izvori energije svakim danom postaju sve akteljniji kako na ekološkom tako i na ekonomskom planu. Pad cene kilovatčasa električne energije dobijene iz energije veta na 3-5 centi, doveo je do snažnog razvoja industrije koja prati proizvodnju opreme za aerocentrale. U Evropi je u 2002. godini zabeležen rast od preko 30% u proizvodnji elektične energije korišćenjem vetra. Kako su potencijali energije veta u Republici Srbiji značajni [1], otuda su interesantna istraživanja na razvoju prevashodno malih aerocentrala, snage 5-10 kW, prevashodno zbog mogućnosti domaćeg tržišta. Takođe, iskustva stečena u razvoju i eksploataciji malih agregata, od neprocenjive su koristi u osvajanju megavatnih postrojenja.

Stepen iskoriscenja aeroturbine je dosta nizak, i teoretski u idealnim uslovima, ne može da prede vrednost od 0.593 što se u literaturu naziva i Betz-ovim limitom [2]. Da bi se postigla što veća efikasnost aeroturbine, posebna pažnja se mora posvetiti geometriji radnog kola. Ovaj organ u dinamičkoj interakciji sa vazduhom dovodi do transformacije strujne

<sup>1</sup> docent dr N.Jovičić, Mašinski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, njovicic@knez.usi.kg.ac.yu

<sup>2</sup> docent dr D.Gordić, Mašinski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, gordic@knez.usi.kg.ac.yu

<sup>2</sup> prof. dr M.Babić, Mašinski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, nastasija@ptt.yu

<sup>2</sup> mr V.Šušteršić, Mašinski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, vanjas@knez.usi.kg.ac.yu

energije vazduha u mehaničku energiju obrtanja radnog kola i u najvećoj meri utiče na stepen iskorišćenja. U literaturi se mogu naći različiti pristupi i modeli za definisanje optimalne geometrije radnog kola aeroturbine koji se uglavnom zasnivaju na jednodimenzionalnim modelima [3]. Takođe, optimizacija geometrijskih parametara radnog kola se može sprovesti korišćenjem modernih numeričkih metoda [4,5,6], i uz angažovanje snažne proračunske infrastrukture.

Cilj ovog rada je bio da se formira jednostavan i efikasan numerički algoritam za geometrijsko modeliranje radnog kola malih aeroturbina. Takođe, težilo se ubrzavanju i automatizaciji procesa projektovanja lopatičnog organa kroz primenu modernih CAD alata.

## 2. MATEMATIČKI MODELL

Matematički model za proračun radnog kola aeroturbine uslovno se može podeliti na dva dela. Prvi deo obuhvata sagledavanje globalnih gaberata radnog kola i baziran je na izrazu za snagu veta koji prode kroz neki presek A:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho c_0^3 A$$

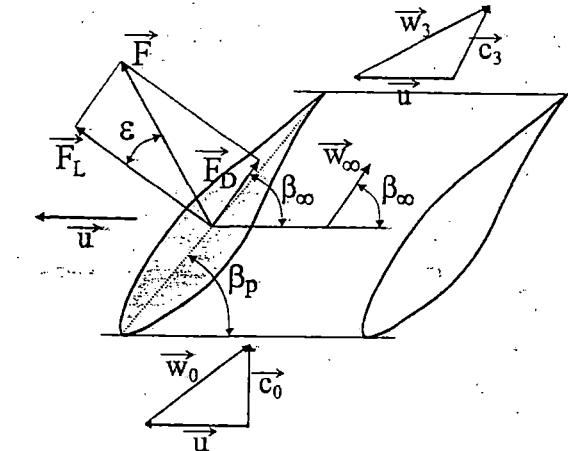
pri čemu je sa  $\rho$  - označena gustina vazduha a sa  $c_0$  - brzina veta. Ako sa  $P$  - označimo nominalnu snagu aeroturbine, tada je:

$$P = P_0 \eta \eta_m = c_p P_0$$

U pethodnom izrazu  $\eta$  je ukupni stepen korisnosti aeroturbine,  $\eta_m$  - mehanički stepen korisnosti multiplikatora broja obrtaja, a  $c_p$  je koeficijent snage aeroturbine koji se kod malih aeroturbina može kretati maksimalno do 0.45 [7]. Na osnovu definisane nominalne snage aeroturbine, brzine veta i izabranog koeficijenta snage mogu se preračunati maksimalni prečnik ( $D_2 \leq 2R_2$ ) i prečnik glavčine aeroturbine. Usvojena koncepcija (položaj ose i broj lopatica radnog kola) diktira optimalnu brzohodost aeroturbine ( $n_z$ ) kao odnosa između obimske brzine vrhova lopatica radnog kola i brzine veta. Ova vrednost je za radna kola sa tri lopatice u granicama od 3-7 i mora se eksperimentalno verifikovati. Imajući prethodno u vidu, broj obrtaja ( $n$ ) radnog kola aeroturbine se može definisati preko sledeće relacije:

$$n = \frac{30 n_z c_0}{R_2 \pi}$$

Poznavanjem glavnih dimenzija i broja obrtaja radnog kola kao i nominalne snage aeroturbine može se ući u drugi deo modela koji se odnosi na definisanje prostorne geometrije lopatice, odnosno uglova postavljanja profila. Prvi korak koji se mora učiniti je izbor adekvatnog aeroprofil za definisanje lopatice. U tom cilju izabran je profil S809 koji je specijalno projektovan za radna kola malih i srednjih aeroturbina [8]. Da bi se omogućilo optimalno prostorno postavljanje profila, u cilju ostvarivanja zadatih trouglova brzina, moguće je koristiti Metodu uzgonskih površina [9]. Kod ove metode lopatični sistem se ne tretira kao niz kanala već kao niz površina, na kojima se javlja sila uzona i sila otpora, što je prikazano na slici 1:



Sl. 1 Aerodinamičke sile i trouglovi brzina u jednoj pokretnoj profilnoj rešetki

Oznake na slici 1 su:

- $\bar{c}_0$  - brzina veta
- $\bar{c}_3$  - absolutna brzina na izlazu iz profilne rešetke
- $\bar{u}$  - obimska (prenosna) brzina radnog kola
- $\bar{w}_0, \bar{w}_1$  - relativne brzine vazduha na ulazu i izlazu iz profilne rešetke
- $\beta_0, \beta_3$  - uglovi relativnih struja vazduha na ulazu i izlazu iz profilne rešetke
- $\bar{w}_\infty$  - srednja relativna brzina  $(\bar{w}_0 + \bar{w}_1)/2$
- $\beta_\infty$  - ugao srednje relativne struje
- $\bar{F}_L, \bar{F}_D$  - aerodinamičke sile uzgona i otpora

Ideja procedure projektovanja lopatice je da se ona podeli na konačan broj profilnih rešetki (u radijalnom pravcu) i u svakoj od njih definiše ugao postavljanja profila preko izraza:

$$\beta_p(r) = \beta_\infty(r) - \alpha(r) \quad (1)$$

pri čemu je  $\alpha$  ugao između ugla srednje relativne struje vazduha i tetine profila (sl. 1). Primenom metode uzgonskih površina, može se doći do relacije oblika:

$$C_L \cdot \left( \frac{l}{t} \right) = \frac{2 Y_{th} c_0 \cos \varepsilon}{w_\infty^2 u \sin(\beta_\infty - \varepsilon)} \quad (2)$$

U prethodnoj jednačini figuriše tehnički rad aeroturbine ( $Y_{th}$ ) koji se može odrediti na osnovu Ojlerove jednačine za turbomašine [9], a vrednost ugla  $\varepsilon$  (sl. 1) se u prvom približenju može pretpostaviti. Na taj način sve veličine na desnoj strani jednačine (2) postaju poznate. Ako se pretpostavi radijalna raspodela funkcije ( $l/t$ ), gde je  $t$  - korak profilne rešetke a  $l$  - dužina profila, sledi:

$$C_L(r) = \left( \frac{t}{l}(r) \right) \cdot RHS(r) \quad (3)$$

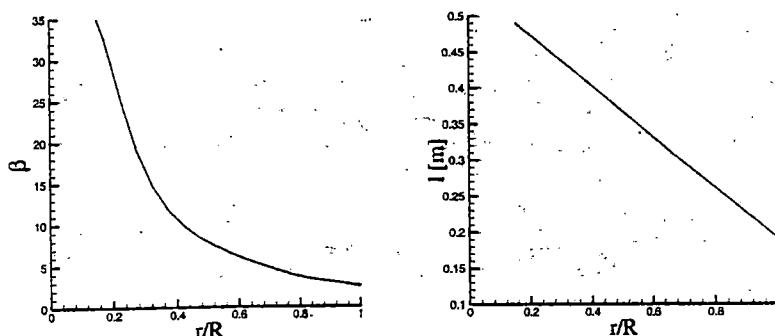
gde je sa  $RHS(r)$  označena desna strana jednačine (2) a.  $C_L$  je koeficijent uzgona profila. Na osnovu podataka za izabrani profil (Prilog A – Tabela A.1), i izračunate vrednosti koeficijenta uzgona  $C_L$  definiše se ugao ( $\alpha$ ) i koeficijent otpora  $C_D$ . Koristeći relaciju:

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{F_D}{F_L} = \operatorname{arctg} \frac{C_D}{C_L}$$

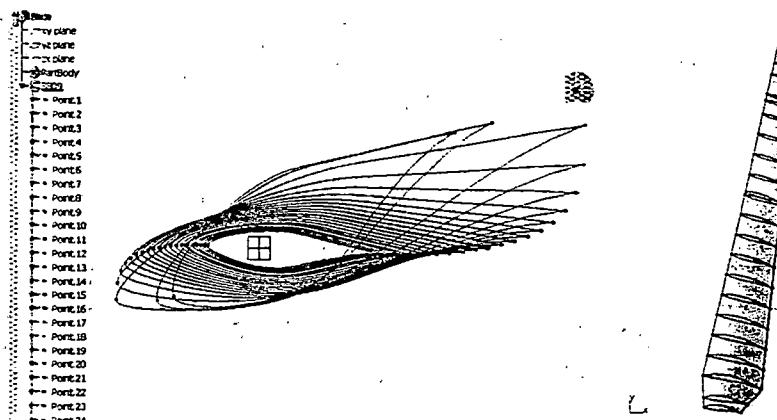
vrši se provera prethodno pretpostavljene vrednosti ugla  $\varepsilon$ , i ako nije ispunjen uslov  $|\varepsilon_{\text{new}} - \varepsilon_{\text{old}}| \leq 10^{-5}$ , procedura se vraća na relaciju (2). Iterativni postupak se završava kada je kriterijum konvergencije zadovoljen na svim radijalnim lokacijama i tada je potpuno definisana funkcija ugla postavljanja profila  $\beta_p(r)$  kao i dužina profila  $l(r)$ .

### 3. PRIMENA NUMERIČKOG ALGORITMA

Na osnovu prethodno definisanog matematičkog modela, formiran je softver za proračun prostorne geometrije radnog kola aeroturbine. Ovaj softver je primenjen za proračun aeroturbine snage 5 kW. Kao projektni parametri usvojena je proračunska brzina veta od 7 m/s, i koncepcija radnog kola sa tri lopatice. Na slici 2 prikazana je dobijena raspodela ugla postavljanja profila kao i raspodela dužine profila u funkciji radijalnog položaja. Na slici 3 prikazan je prostorni izgled razvijene lopatice formiran u softverskom paketu CATIA. Za formiranje ovog 3D modela na raspolaganju je bilo blizu 2000 tačaka. Kako bi se automatizovao postupak, koordinate tačaka su iz proračunskog modula, učitane u EXCEL a zatim primenom odgovarajućih makroa, iskorišćene za formiranje žičanog modela u modulu CATIA Wireframe&Surface Design. Kao što se na 3D modelu vidi, deo lopatice u blizini glavčine je naknadno modifikovan kako bi se postigla veća čvrstina lopatice u korenu.



Sl. 2 Raspodela a) ugla postavljanja profila; b) dužine teteve profila



Sl. 3 CATIA 3D model lopatice radnog kola

### 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan razvijeni numerički algoritam za geometrijsko modeliranje lopatica radnog kola horizontalne-osne aeroturbine. Korišćenjem jednodimenzionske teorije i metode uzgonskih površina formiran je relativno jednostavan ali i efikasan metod za projektovanje malih aeroturbina. Razvijeni algoritam je iskorišćen za proračun glavnih dimenzija aeroturbine snage 5 kW. Pri projektovanju snažnijih aerocentrala, ulaganja su znatno veća, pa je od posebne važnosti maksimizovanje iskorišćenja. Otuda, kao nastavak ovih istraživanja pokrenut je i razvoj modela za predviđanje radnih karakteristika aeroturbine u različitim režimima eksploracije, kako bi se u jednom zatvorenom ciklusu izvršilo i projektovanje i optimizacija geometrije radnog kola.

### LITERATURA

- [1] Ocena mogućnosti korišćenja energije veta na teritoriji Republike Srbije, Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, 1997
- [2] Johnson G., Wind Energy Systems, Electronic Edition, Prentice-Hall, 2001
- [3] Selig M.S., Tangler J.L., Development and Application of a Multipoint Inverse Design Method for Horizontal Axis Wind Turbines, Wind Engineering, Vol 19, No. 2, pp. 91-105, 1995
- [4] Xu G., Computational Studies of Horizontal Axis Wind Turbines, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2001
- [5] Corten G.P., Flow Separation on Wind Turbine Blades, PhD Thesis, University of Utrecht, 2001
- [6] Sørensen N.N., Michelsen J.A., Schreck S., Navier-Stokes predictions of NREL phase VI rotor in the NASA Ames 80 ft x 120 ft wind tunnel, Wind Energy, Vol 5, Issue 2-3, 2002
- [7] Giguerre P., Selig M.S., Design of a Tapered and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor, NREL/SR 500/26173, National Renewable Energy Laboratory, USA, 1999
- [8] Sommers D.M., Design and Experimental Results for the S809 Airprofil, NREL/SR 440/6918, National Renewable Energy Laboratory, USA, 1997
- [9] Babić M., Stojković S., Turbomašine – Teorija i matematičko modeliranje, Prosveta, Beograd, 1997.

## PRILOG A Tabela A.1. Aerodinamički koeficijenti aeroprofilja S809

$\alpha(^{\circ})$	$c_L$	$c_D$	$c_M$
-180.00	.000	0.1748	0.0000
-170.00	.230	0.2116	0.4000
-160.00	.460	0.3172	0.1018
-150.00	.494	0.4784	0.1333
-140.00	.510	0.6743	0.1727
-130.00	.486	0.8799	0.2132
-120.00	.415	1.0684	0.2498
-110.00	.302	1.2148	0.2779
-100.00	.159	1.2989	0.2933
-90.00	.000	1.308	0.2936
-80.00	.159	1.2989	0.2933
-70.00	.302	1.2148	0.2779
-60.00	.415	1.0684	0.2498
-50.00	.486	0.8799	0.2132
-40.00	.510	0.6743	0.1727
-30.00	.494	0.4784	0.1333
-20.10	.560	0.3027	0.0612
-18.10	.670	0.3069	0.0904
-16.10	.790	0.1928	0.0293
-14.20	.840	0.0898	-0.0090
-12.20	.700	0.0553	-0.0045
-10.10	.630	0.039	-0.0044
-8.20	.560	0.0233	-0.0051
-6.10	.640	0.0131	0.0018
-4.10	.420	0.0134	-0.0216
-2.10	.210	0.0119	-0.0282
0.0	.050	0.0122	-0.0346
2.00	.300	0.0116	-0.0405
4.10	.540	0.0144	-0.0455
6.20	.790	0.0146	-0.0507
8.10	.900	0.0162	-0.0404
10.20	.930	0.0274	-0.0321
11.30	.920	0.0303	-0.0281
12.10	.950	0.0369	-0.0284
13.20	.990	0.0509	-0.0322
14.20	1.010	0.0648	-0.0361
15.30	1.020	0.0776	-0.0363
16.30	1.000	0.0917	-0.0393
17.10	.940	0.0994	-0.0398
18.10	.850	0.2306	-0.0983
19.10	.700	0.3142	-0.1242
20.10	.660	0.3186	-0.1155
30.00	.705	0.4784	-0.2459
40.00	.729	0.6743	-0.2813
50.00	.694	0.8799	-0.3134
60.00	.593	1.0684	-0.3388
70.00	.432	1.2148	-0.3557
80.00	.227	1.2989	-0.3630
90.00	.000	1.308	-0.3604
100.00	.159	1.2989	-0.3600
110.00	.302	1.2148	-0.3446
120.00	.415	1.0684	-0.3166
130.00	.486	0.8799	-0.2800
140.00	.510	0.6743	-0.2394
150.00	.494	0.4784	-0.2001
160.00	.460	0.3172	-0.1685
170.00	.230	0.2116	-0.5000
180.00	.000	0.1748	0.0000

6. MEDUNARODNO SAVJETOVANJE O  
DOSTIGNUĆIMA ELEKTRO I MAŠINSKE  
INDUSTRije6 th INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON ACCOMPLISHMENTS OF  
ELETTRICAL AND MECHANICAL  
INDUSTRIESBANJALUKA  
DEMI  
2003

30./31.5.2003. god.

ON-LINE MERENJE NIVOA POVRŠINSKIH VODA  
POMOĆU ULTRAZVUČNIH DAVAČADragan Taranović<sup>1</sup>, Zoran Kalinić<sup>2</sup>, Aleksandar Grujović<sup>3</sup>

**Rezime:** Pri eksploraciji površinskih voda neophodno je praćenje njihovog nivoa. Na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu su realizovane dve prototipske varijante sistema za beskontaktno merenje nivoa površinskih voda. Prva varijanta je na bazi inteligentnog ultrazvučnog davača sa strujnim izlazom (proizvođač ABB) i elektronskim modulom sa serijskim interfejsom RS-232C za vezu sa računaram, konstruisanim i izvedenim na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Druga prototipska varijanta je sa pijezelektričnim keramičkim predajnim i prijemnim pretvaračima firme Murata i elektronskim modulom za generisanje i obradu signala i serijskim interfejsom za vezu sa računaram konstruisanim i izrađenim na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Za obradu signala koristi se odgovarajući namenski razvijeni program za akviziciju podataka. U radu su dati rezultati ispitivanje oba prototipa i izvršeno je upoređenje njihovih karakteristika.

**Ključne reči:** nivo, ultrazvučni davač, on-line merenje

ON-LINE SURFACE WATER LEVEL MEASUREMENT  
USING ULTRASONIC TRANSDUCERS

**Abstract:** When using surface water, it is necessary to monitor its level. On Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac two prototypes of non-contact surface water level measurement systems are realized. First system is based on intelligent-ultrasonic-transducer with current output (produced by ABB) and electronic module with serial interface RS-232C for connection to the computer, designed and produced on Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac. Second prototype is based on piezoelectric ceramic transmitter and receiver (produced by Murata Company) and electronic module for generation and signal processing and serial interface to the computer, also designed and produced on Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac. For signal processing appropriate specially developed software is used. In this paper results of testing for both prototypes are presented and their characteristics are compared.

**Keywords:** level, ultrasonic transducer, on-line measurement

<sup>1</sup> Mr Dragan Taranović, asistent, Kragujevac, Mašinski fakultet u Kragujevcu, tara@kg.ac.yu

<sup>2</sup> Zoran Kalinić, asistent pripr., Kragujevac, Mašinski fakultet u Kragujevcu, kalinic@kg.ac.yu

<sup>3</sup> Dr Aleksandar Grujović, red. prof., Kragujevac, Mašinski fakultet u Kragujevcu, aleksa@kg.ac.yu