

## Eksperimentalno ispitivanje relativnog strujanja kroz model prave profilne rešetke

Dr Slavica Ristić, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Pejo Majstorović, dipl.inž.<sup>2)</sup>

Prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja polja vektora brzine relativnog strujanja kroz model prave profilne rešetke brzohodne osne pumpe. Ispitivanja su vršena u vodenokavitacionom tunelu (VKT) za brzinu neporemećene struje  $V_\infty = 5.32$  m/s. Model se sastoji od tri profila. Raspodela brzine oko centralnog profila merena je laser Doppler anemometrijskom metodom (LDA). Vizualizacija strujanja je izvršena pomoću anilinskih boja i vazдушnih mehurića. Rezultati su prikazani pomoću mape polja vektora brzine oko profila, a pomoću dijagrama je prikazana promena relativne brzine strujanja po osi  $z$  (vertikalna osa u odnosu na površinu profila) za različite preseke po tetivi profila. Rezultati vizualizacije strujanja su ilustrovani fotografijama.

*Ključne reči:* Turbomašine, osne pumpe, prava profilna rešetka, vodenokavitacioni tunel, laser Doppler anemometrija.

### Korišćene oznake i simbol

$V_\infty$	– brzina u neporemećenoj struji fluida,
$P_s$	– statički pritisak,
$P_{tot}$	– totalni pritisak,
$V_z$	– vertikalna komponenta vektora brzine,
$V_h$	– horizontalna komponenta brzine,
$V_m$	– meridijalna brzina,
$V_u$	– prenosna brzina (obimna brzina),
$v$	– vektor brzine,
$T$	– stepen turbulencije,
$\beta_r$	– nagibni ugao rešetke,
$\beta_p$	– nagibni ugao profila,
$\delta_{max}$	– maksimalna debljina profila,
$\ell$	– dužina tetiva profila,
$\ell_\delta$	– dužina na kojoj se nalazi najveća debljina profila,
$s$	– skeletna linija profila,
$t$	– korak rešetke,
$n$	– broj obrtaja pumpe,
$\eta$	– stepen korisnosti pumpe (iskorišćenja),
$\Gamma$	– cirkulacija,
$Q$	– protok kroz rešetku,
$H$	– napor pumpe,
$Y$	– jedinični rad pumpe i
$P$	– snaga pumpe.

### Uvod

**S**TRUJANJA u turbomašinama su prostornog i nestacionarnog karaktera. Ovakva strujanja su veoma komplikovana za proučavanje zbog čega je neophodno da

se uvedu određeni modeli i uprošćenja u teorijskim ispitivanjima, a najnovije tehnologije i merne metode u eksperimentalnim ispitivanjima [1,2]. Rezultat velikog broja istraživanja u ovoj oblasti jesu savremene konstrukcije turbomašina visokih energetske i eksploatacionih karakteristika.

Princip rada turbomašina se zasniva na dinamičkom, uzajamnom delovanju lopatica radnog kola i fluida koji kroz njih struji. Radno kolo pumpe se okreće zatom ugaonom brzinom i predaje energiju fluidu, dok ga neprestano premešta od ulaza prema izlazu. Posebna grupa turbomašina su osne pumpe, kod kojih strujanje u meridijalnoj ravnini, u oblasti radnog kola, ima osni smer. Strujanje se odvija po cilindrima čija je osa jednovremeno i osa obrtanja radnog kola. Porast pritisne energije u oblasti radnog kola je na račun transformacije kinetičke energije. Osnovna pretpostavka pri razmatranju kinematike strujanja u osnim pumpama, jeste odsustvo radialne komponente apsolutne brzine [1].

Za proučavanje trodimenzionalnih strujanja kroz osne turbomašine, veoma često se uvodi dvodimenzionalna aproksimacija, odnosno, koristi se slika strujanja kroz prave ravanske rešetke profila, koje se dobijaju razvijanjem cilindričnih preseka strujnog prostora u radnom kolu osne turbomašine.

Teorijska istraživanja se vrše najčešće za neviskozni fluid. Poznato je da se kinematičke karakteristike stvarnog turbulentnog strujanja, van graničnog sloja, zadovoljavajuće podudaraju sa kinematičkim karakteristikama strujanja neviskoznog fluida. Pored pretpostavke o strujanju neviskoznog fluida, u hidrodinamičkoj teoriji rešetaka pretpostavlja se i da je fluid nestišljiv a strujanje stacionarno. Od teorijskih metoda najviše se koriste metoda singulariteta i metoda

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

<sup>2)</sup> VPI205 – Beograd

konformnog preslikavanja.

U eksperimentalnim ispitivanjima, od velike je važnosti poznavanje polja brzine između profila, i raspodela statičkog i totalnog pritiska ispred i iza rešetke. Metode, koje se koriste u eksperimentu, ne smeju da unose poremećaj u već složeno strujanje. Na osnovu izmerenih veličina mogu da se odrede trouglovi brzine na ulazu i izlazu iz rešetke, brzina neporemećene struje i strujno brzinsko skretanje rešetke. Takođe, mogu da se odrede koeficijenti pritiska, koeficijenti sile uzgona i sile otpora, raspodela pritiska i stepen korisnosti rešetke.

U radu su prikazani eksperiment i rezultati ispitivanja polja brzine u modelu prave profilne rešetke brzohodne osne pumpe. Model je projektovan i urađen od tri profila. Zbog tehničkih nemogućnosti, u radnom delu vodenog tunela, nije bilo moguće napraviti model beskrajsne rešetke i postaviti je pod uglom od  $22^\circ$  koji odgovara uglu prave profilne rešetke. Ispitivanje je vršeno u vodenokavitacionom tunelu *Vojnotehničkog instituta VJ*.

Brzina je merena pomoću LDA, oko središnjeg profila. Ova metoda omogućava određivanje brzine strujanja fluida u veoma širokom dijapazonu sa etalonskom tačnošću.

Vizualizacija strujanja je metoda koja omogućava da se "vide" strujne linije i da se dođe do dodatnih informacija o prirodi složenih strujnih polja [6,8,9,13]. Postoje različite metode vizualizacije zavisno od prirode fluida i brzine strujanja. Ubacivanje obojenih strujnica ispred modela omogućava da se vidi povijanje struje i pojava strujnog vrtloga.

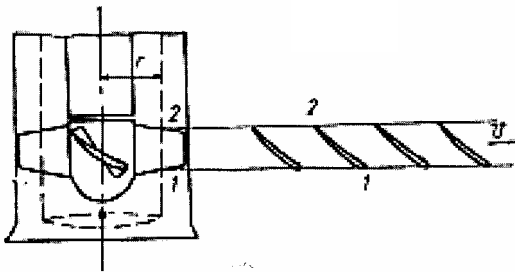
Na osnovu izmerenih vrednosti, prikazana je raspodela vektora brzine u više preseka dvodimenzionalnog strujnog polja, data je mapa vektora brzine i fotografije sa vizualizacijom strujanja.

## Prava profilna rešetka

### Nastanak prave profilne rešetke i geometrijski parametri

Pri proračunu osnih (aksijalnih) turbomašina široku primenu je našla šematizacija strujanja u protočnom delu, gde se strujanje odvija u oblasti radnog kola po cilindričnim površinama, koje su saosne sa osom obrtanja turbomašine [1].

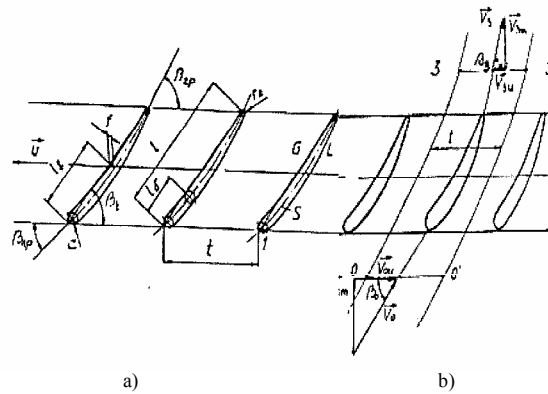
Ako se radno kolo osne turbomašine preseče cilindrom proizvoljnog radijusa  $r$  dobija se cilindrična rešetka. Razvijanjem cilindrične rešetke u ravan nastaje prava profilna rešetka (sl.1).



Slika 1. Nastanak prave profilne rešetke

Prava profilna rešetka može da se produži sa obe strane, pa se zbog toga smatra da je rešetka beskonačna. Pravu rešetku profila gradi beskonačan broj jednakih profila ekvidistantno postavljenih duž prave koja se naziva osom rešetke i poklapa se sa pravcem obimne brzine ( $u$ ).

Rastojanje između podudarnih tačaka dva susedna profila predstavlja korak rešetke ( $t$ ), a geometrijsko mesto centara krugova upisanih u profilu definiše srednju liniju ili skeletnu liniju profila ( $S$ ). Skeletna linija profila može biti prava, kružni luk ili parabola. Na profilu se razlikuju: grudna ( $G$ ), udubljena strana, ledna ( $L$ ), ispupčena strana, čelo, glatko zaobljenje radijusa  $r_1$  i rep, koji može biti glatko zaobljenje radijusa  $r_2$  ili ugaoni (šiljast) završetak sa uglom klina ( $\delta$ ) (sl.2a).



Slika 2. Geometrijski parametri strujanja u pravu profilnu rešetku

Presek skeletne linije sa čelom profila određuje napadnu ivicu (1), a presek sa repom, izlaznu ivicu (2a). Duž, koja spaja ivice profila, naziva se tetivom profila ( $l$ ). Odnos između koraka rešetke i tetive profila  $t_r = t/l$  predstavlja relativni korak, a njemu recipročna vrednost  $l/t_r$  je gustina rešetke.

Značajni podaci o profilu su, pored navedenih, njegova najveća debljina ( $\delta_{max}$ ) i mesto gde se ona nalazi ( $l_\delta$ ), a kod krivih profila i najveće rastojanje skeletne linije od tetive profila, tzv. zakrivljenost profila ( $f$ ), kao i njen položaj ( $l_f$ ). Normalno rastojanje između napadne i izlazne ivice rešetke naziva se širina rešetke ( $b$ ). Pored koraka  $t$ , položaj profila u pravoj profilnoj rešetki definiše i ugaon nagiba rešetke, odnosno ugaon nagiba profila ( $\beta_p$ ) - kojeg tetiva profila zaklapa sa osom rešetke. Karakteristične veličine rešetke profila su i uglovi profila na ulazu ( $\beta_{1p}$ ) i izlazu ( $\beta_{2p}$ ) iz rešetke, definisani kao uglovi između ose rešetke i odgovarajuće tangente skeletne linije u ivičnim tačkama.

Potencijalno strujanje nestišljivog fluida kroz pravu profilnu rešetku je detaljno opisano u [2,3].

U teorijskom proučavanju strujanja kroz pravu profilnu rešetku pretpostavlja se da je strujanje potencijalno, i da struji nestišljiv fluid. Ova pretpostavka ima veliki značaj u teoriji turbomašina zbog toga, što se slika usrednjenog, realnog turbulentnog strujanja dobro poklapa sa slikom potencijalnog strujanja, van graničnog sloja.

Ako se posmatra strujanje oko profila rešetke u prostoru ograničenom dvema paralelnim strujnim linijama (0-3') i (0'-3'), na rastojanju koraka rešetke (sl.2b), i odseccima (0-0') ispred i (3-3') iza rešetke, može da se zaključi sledeće:

- Pri strujanju nestišljivog fluida, po jednačini kontinuiteta, meridijanske (protočne) komponente brzina ispred i iza rešetke su jednake  $V_{0m} = V_{3m}$  (sl.2b). U stvarnosti  $V_{3m}$  je malo veće zbog suženja protočnog preseka, pojave graničnog sloja i vrtložnog traga.
- Iz uslova potencijalnog (bezvrtložnog) strujanja, razlika intenziteta struje fluida ispred ( $V_{0u} \cdot t$ ) i iza rešetke

$(V_{3u} \cdot t)$  jednaka je cirkulaciji brzine po konturi profila

$$\Gamma = \int V_{(s)} ds.$$

Totalni pritisak ispred rešetke  $p_{0tot}$  veći je od totalnog pritiska iza rešetke  $p_{3tot}$ , što znači da se ta razlika pritiska trošila na savlađivanje otpora strujanja kroz rešetku.

Količnik  $p_{3tot}$  i  $p_{0tot}$  određuje stepen korisnosti rešetke  $\eta = p_{3tot}/p_{0tot}$  i uvek je manji od jedan.

Na izlazu iz rešetke, odnosno iza repa profila, dolazi do zakretanja struje, usled pada pritiska od grudne ka leđnoj strani profila, posle čega dolazi do obrazovanja vrtložnog traga. Pri strujanju viskoznog fluida kroz rešetku, formira se granični sloj, koji je deblji na leđnoj strani nego na grudnoj strani profila. Vrtlozi koji nastaju obrazuju polje dodatne brzine i povezani su sa gubitkom strujne energije, koja se troši na obrazovanje vrtloga i vrtložnog traga koji nastaje u fluidu i u kome se strujna energija pretvara u toplotu.

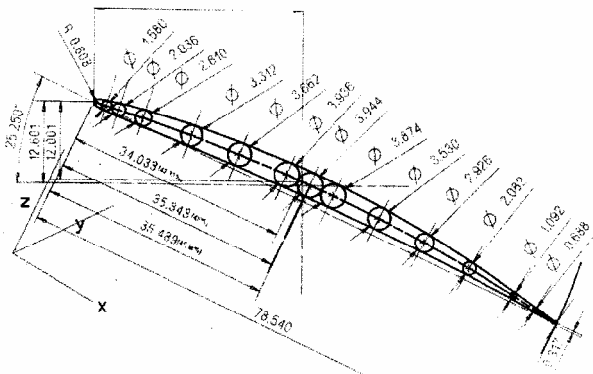
Poznavanje strujnog polja oko modela prave profilne nepokretne rešetke može da omogući značajna saznanja o strujanju u pravoj profilnoj rešetki, odnosno u brzohodnoj pumpi. LDA se više godina koristi u laboratorijama *Vojnotehničkog instituta VJ* za merenje brzine strujanja, i pokazalo se da je ona nezamenljiva pri ispitivanju složenih strujnih polja.

### Eksperiment

Zbog nemogućnosti da se izvrše merenja vektora brzine strujanja vode kroz pravu pumpu, ili njenu pravu profilnu rešetku, a imajući u vidu teorijske aproksimacije [1], pristupilo se izradi modela prave profilne rešetke.

#### Geometrija modela profila i modela profilne rešetke

Na sl.3 su prikazane geometrijske karakteristike profila lopatice brzohodne osne pumpe. Model ravne rešetke se sastoji od tri profila postavljena na rastojanju od 84 mm. Raspon profila je 100 mm. Profili su dvodimenzionalni i montirani između dve vertikalne ploče fiksirane čeličnim pločama na rastojanje od 100 mm (sl.4a i 4b). Modeli profila mogu da se postave tako da je napadni (nagibni) ugao  $0^\circ$  ili  $25^\circ$ . Međusobni raspored profila može da bude takav, da su vertikalno poredani u odnosu na nailazeću struju, ili poredani tako, da osa rešetke zaklapa ugao od  $68^\circ$  sa nailazećom strujom fluida. Model je fiksiran, nepokretan, a strujanje oko modela je brzine koja odgovara relativnoj brzini strujanja kroz brzohodnu osnu pumpu.



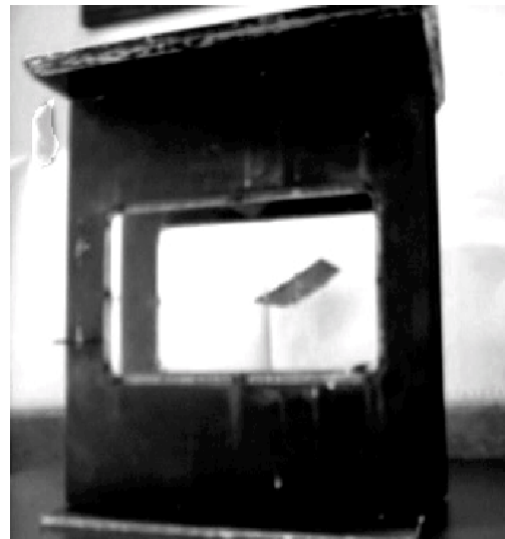
Slika 3. Geometrijske karakteristike profila

Profili od kojih je napravljena ogledna rešetka izrađeni

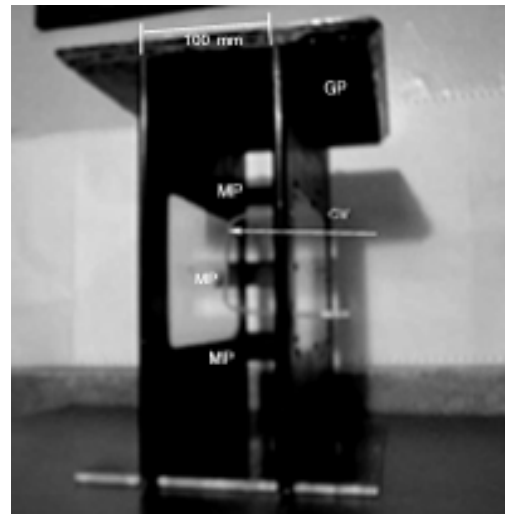
su na programskoj glodalici CNC i to konturnim glodanjem po zadatoj površini, u razmeri 1:5. Materijal od kojeg su napravljeni profili je duraluminijum kvaliteta koji se zahteva u vazduhoplovstvu, oznake WH.3.1354. Pleksi ploče ugrađene u vertikalne zidove su visokog optičkog kvaliteta i omogućavaju nesmetan prolazak laserskih snopova do merne tačke, odnosno u prostor oko srednjeg profila. Gornji i donji profil su postavljeni da bi obezbedili međuprofilni uticaj. Vertikalni zidovi modela su fiksirani čeličnim pločama, od kojih gornja zamenjuje gornji prozor u radnom delu vodenog tunela.

#### Opis eksperimenta

Eksperimentalna ispitivanja su vršena u vodenokavitationom tunelu *Vojnotehničkog instituta VJ*. Model prave profilne rešetke se postavlja u radnom delu (RD) vodeno-kavitationog tunela (VKT) (sl.4 i sl.5).



a)



b)

Slika 4. Model profilne rešetke

VKT je zatvorenog tipa sa horizontalnim radnim delom, čije su dimenzije  $500 \times 500 \times 300$  mm [4]. Brzina neporemećenog strujanja u radnom delu vodenog tunela može da se menja kontinuirano [4,5], a maksimalna brzina

strujanja iznosi 11 m/s. Prozori od klirita ugrađeni su u predelu radnog dela tako, da je moguće vizuelno posmatrati model, vršiti vizualizaciju strujanja različitim metodama i koristiti optičke metode za ispitivanje [6-9].

U okviru ovog eksperimenta, merene su horizontalna i vertikalna komponenta brzine strujanja za utvrđenu mrežu tačaka strujnog prostora. U tu svrhu koristio se laser Doppler anemometar. Teorijski osnovi metode su poznati [1,10-12], pa se neće detaljno opisivati u ovom radu.

Laserski zrak, odnosno laserska «sonda», ne remeti strujanje [1,10-14]. Osim srednje brzine, ovom metodom se može izmeriti i stepen turbulencije. Kalibraciona konstanta LDA sistema se poznaje kada je:

$$C = (\lambda/2) \sin(\alpha/2) \quad (1)$$

Na osnovu izmerene Dopplerove frekvencije određuje se brzina:

$$V_{sr} = C f_d \quad (2)$$

odnosno, komponenta brzine normalna na interferencione linije u mernoj zapremini. Za nestacionarna strujanja neophodno je napraviti što veći broj merenja ( $N$ ), tako da je:

$$V_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad \text{i} \quad |\Delta V_i| = |V_{sr} - V_i| \quad (3)$$

Za izračunavanje stepena turbulencije potrebno je da se odredi srednje kvadratno odstupanje brzine (RMS):

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N |\Delta V_i|^2} \quad \text{i} \quad (4)$$

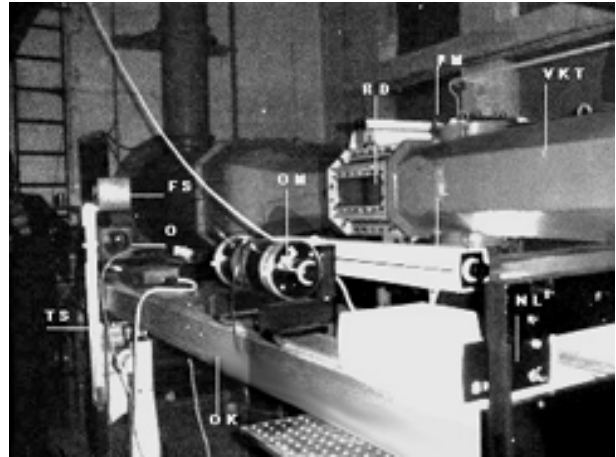
$$T(\%) = \frac{RMS}{V_{sr}} 100 \quad (5)$$

U standardnoj konfiguraciji LDA sistem ima softverske module, koji pored srednje brzine daju i vrednosti za RMS.

Vizualizacija strujnog polja je vršena sa anilinskim bojama i mehurićima vazduha, koji se specijalnim sistemom cevčica (CV) (sl.4b) ubacuju ispred modela na principu podsisavanja iz spoljašnjeg rezervoara. Na vertikalnom delu cevčice nalazi se niz od pet rupica prečnika 1mm. Kroz sve, ili kroz nekoliko izabranih rupica ubacuje se rastvor ljubičaste anilinske boje i alkohol (rastvor ima gustinu veoma blisku gustini vode, kako bi se minimizirala pojava difuzije obojene strujnice), ili vazduh. Radni deo vodenog tunela i model se osvetljavaju sa dva reflektora jačine 200 W. Snimanje efekata vizualizacije strujanja vršeno je fotoaparatom *Minolta*, na filmu povećane osetljivosti.

Raspored komponenata LDA sistema oko radnog dela prikazan je na sl.5. Izvor svetlosti He-Ne laser od 15 mW (L), napajanje lasera (NP), optički model (OM) sa predajnom optikom (FS) se nalaze na optičkoj klupi (OP) sa jedne strane VKT. Pomoću sistema za traverziranje (TS) pozicionira se presečna tačka laserskih snopova. Frontalno sočivo ima fokus 1200 mm. Kalibraciona konstanta LDA sistema u izabranoj konfiguraciji iznosi 17.29 m/s MHz. Dimenzije merne zapremine (prostor gde se seku laserski snopovi pod uglom od  $2^\circ$ ) [10] su  $dx=0.88$  mm,  $dy=0.88$  mm i  $dz=12.4$  mm. Unutar merne zapremine postoji 49 interferencionih linija. Zbog konfiguracije prostora oko

radnog dela vodenokavitacionog tunela, nije bilo moguće koristiti frontalna sočiva manjeg fokusa, što bi formiralo mernu zapreminu manje dužine. Zbog ovih dimenzija ograničeno je približavanje merne tačke do konture modela. Primer: najbliža tačka do napadne ivice u kojoj može da se meri brzina strujanja je  $-0.5$  mm. Fotodetektor PM se postavlja tako da detektuje svetlost pod uglom od približno  $180^\circ$ . Prijemna optika sa fotomultiplikatorom, sistem za akviziciju i obradu podataka, bafer interfejs, računar PDP 73 Micro, terminal (T), monitor (M) i štampač (P), se nalaze sa druge strane VKT, pa se ne vide na sl.5.



Slika 5. LDA i vodenokavitacioni tunel

Nije bilo moguće istovremeno merenje obe komponente vektora brzine strujanja. Prvo je merena horizontalna komponenta, a okretanjem optičkog modula za  $90^\circ$  merena je vertikalna komponenta brzine strujanja vode, u istim tačkama gde je merena horizontalna komponenta. Za svaku izabranu tačku izvršena je akvizicija 800 signala, izračunata je srednja vrednost brzine strujanja po komponentama, kao i turbulencija. U desetak tačaka vršena su merenja po 1600, 3200 i 6400 signala, kako bi se što preciznije odredila turbulencija. Pokazalo se da su dobijeni rezultati identični i da nema potrebe raditi sa više od 800 signala [3,7].

Najkvalitetnija merenja su dobijena u čistoj vodi u kojoj nema mnogo mehurića vazduha. U prvom delu eksperimenta je izvršeno baždarenje radnog dela vodenog tunela metodom koja je opisana u citiranoj literaturi [11].

Raspodela vektora strujanja oko središnjeg profila je ispitana za brzinu neporemećene struje od 5.32 m/s. Rezultati merenja za svaku tačku su dobijeni kao histogram raspodele brzine strujanja gde je data srednja vrednost brzine i srednje kvadratno odstupanje brzine. Na osnovu tih rezultata, izračunat je vektor brzine i turbulencija.

Napravljen je kompromis između zahteva, pod kojim uglom se postavlja prava profilna rešetka i mogućnosti raspoloživog prostora u radnom delu vodenokavitacionog tunela. Za ispitivanje su izabrani sledeći elementi:

- osa profilne rešetke sa pravcem nailazeće struje  $\beta_r$  koja treba da iznosi  $90^\circ$ , a napadni (nagibni) ugao profila  $\beta_p = 0^\circ$  i  $25^\circ$ ,
- osa profilne rešetke  $\beta_r$  postavljena pod uglom  $\beta_r$  od  $68^\circ$  u odnosu na struju, a napadni ugao profila  $\beta_p = 0^\circ$  i  $25^\circ$ .

### Analiza rezultata

Osnovni cilj istraživanja je da se odredi mapa vektora brzine strujanja oko srednjeg profila u pravoj profilnoj

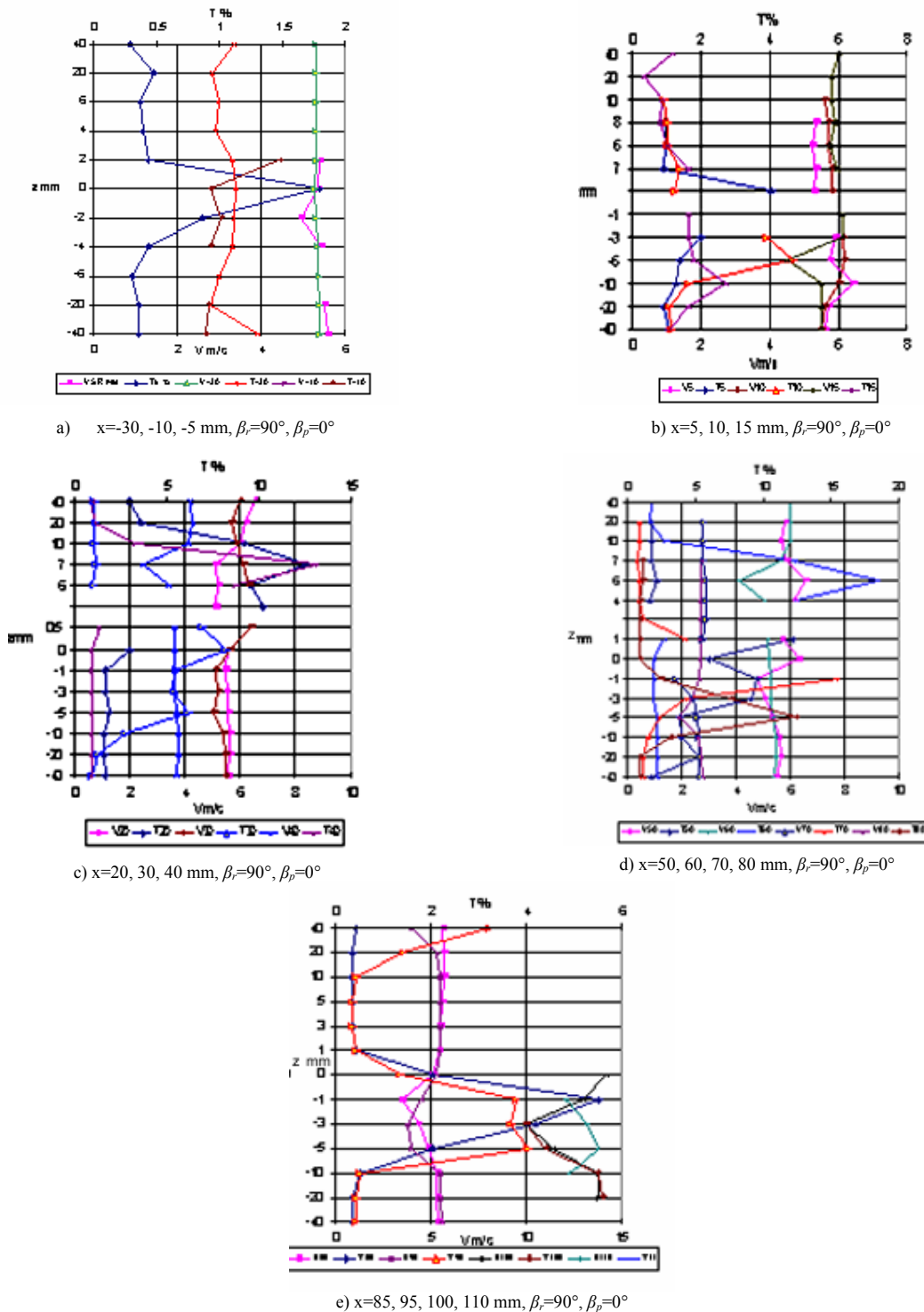
rešetki. Dobijeni rezultati su prezentirani na dva načina:

- pomoću mape vektora brzine strujanja oko srednjeg profila za slučaj kada je ugao rešetke  $\beta_r = 90^\circ$ , a napadni ugao profila  $\beta_p = 0^\circ$  i  $\beta_p = 68^\circ$ , a napadni ugao profila  $\beta_p = 25^\circ$ ;
  - dijagrami promena apsolutne vrednosti vektora brzine po vertikalnoj osi ( $z$ ) za određene preseke po osi  $x$  za leđni i grudni deo profila, za navedene kombinacije ugla rešetke i ugla profila;
  - fotografije koje prikazuju efekte vizualizacije strujanja dobijene pomoću obe metode.
- Merenja pokazuju da je brzina strujanja vode u VKT

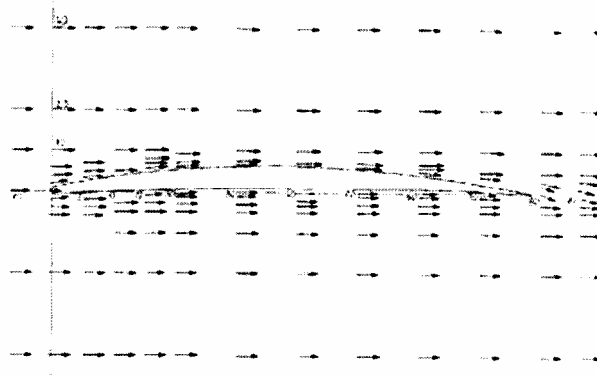
približno linearna funkcija u odnosu na broj obrtaja motora. Ponovljivost rezultata je veoma visoka. Ispitivanje turbulencije u neporemećenoj struji pokazuje da se ona kreće oko 1.1 % [4].

*Analiza rezultata za  $\beta_r = 90^\circ$  i  $\beta_p = 0^\circ$*

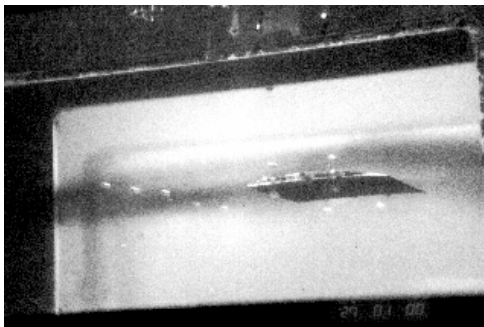
Na slikama 6 (a,b,c,d,e) su prikazani dijagrami zavisnosti brzine  $V$  i turbulencije  $T$ . Za strujanje ispred profila, odnosno ispred rešetke, rezultati su dati na slici 6a, za  $x = -30, -10, -0.5$  mm.



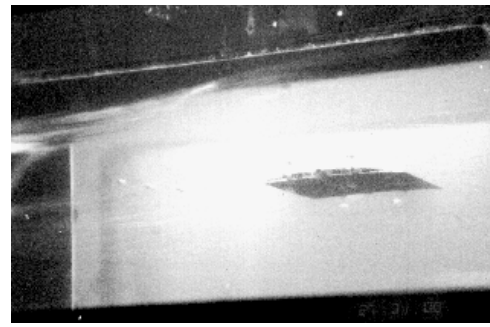
Slika 6. Dijagram brzine i turbulencije oko profila



Slika 7. Mapa vektora brzine



a)



b)

Slika 8. Vizualizacija strujanja oko profila sa anilinskim bojama (a) i vazдушnim mehurićima (b)

Brzina strujanja opada za vrednosti u neposrednoj blizini zaustavne tačke za  $x=0$  mm. U toj tački se povećava turbulencija do 5%. U ostalom delu, ispred modela turbulencija je  $\approx 1\%$ , a brzina je bliska vrednosti neporemećene struje i iznosi  $\approx 5.3$  m/s do 5.6 m/s (sl.6a).

Na slikama 6 (b,c,d) prikazani su dijagrami koji pokazuju promene brzine po presecima duž profila. Na sl.6b može da se vidi da je brzina strujanja veća u predelu neposredno ispod modela (grudni deo) za  $x=5$  mm i 10 mm, a za  $x=15$  mm veća je brzina sa leđne strane modela. Analiza sl.6c pokazuje da debljina graničnog sloja za preseke  $x=20$  mm, 30 mm i 40 mm iznosi  $\approx 1$  mm. Na ovim presecima veća je brzina na leđnom delu profila.

Preseci za  $x=50$  mm, 60 mm, 70 mm i 80 mm (sl.6d) nalaze se u drugoj polovini profila, gde se njegova debljina smanjuje i gde se povećava debljina graničnog sloja. Pošto je dužina tetive profila 78.54 mm (sl.3), merenja za  $x=80$  mm su neposredno iza izlazne ivice modela. Na ovom preseku, širina turbulentnog traga je  $\approx 3$  mm ( na slici 6d turbulencija je veća od 3 % za vrednosti  $z$  između 1 mm i 4 mm). Turbulentni trag se širi sa udaljenošću od izlazne ivice. Primer za  $x=110$  mm (sl.6e) vrednosti turbulencije su veće od 3% u intervalu  $z$  od  $-5$  mm do 3 mm, pa se za širinu vrtložnog traga može računati da iznosi  $\approx 8$  mm. U prostoru iza rešetke srednja brzina je  $\approx 6$  m/s, što je potvrda da je  $V_{3m}$  veća od  $V_{1m}$ .

Vektorski dijagram polja brzine strujanja dat je na sl.7. Jedinična dužina vektora iznosi 5 m/s. Vektor je izračunat na osnovu izmerene horizontalne i vertikalne komponente brzine strujanja (komponente paralelne sa  $x$  i sa  $z$  osom). Ugao vektora brzine je dobijen kao tangens vertikalne i horizontalne komponente brzine.

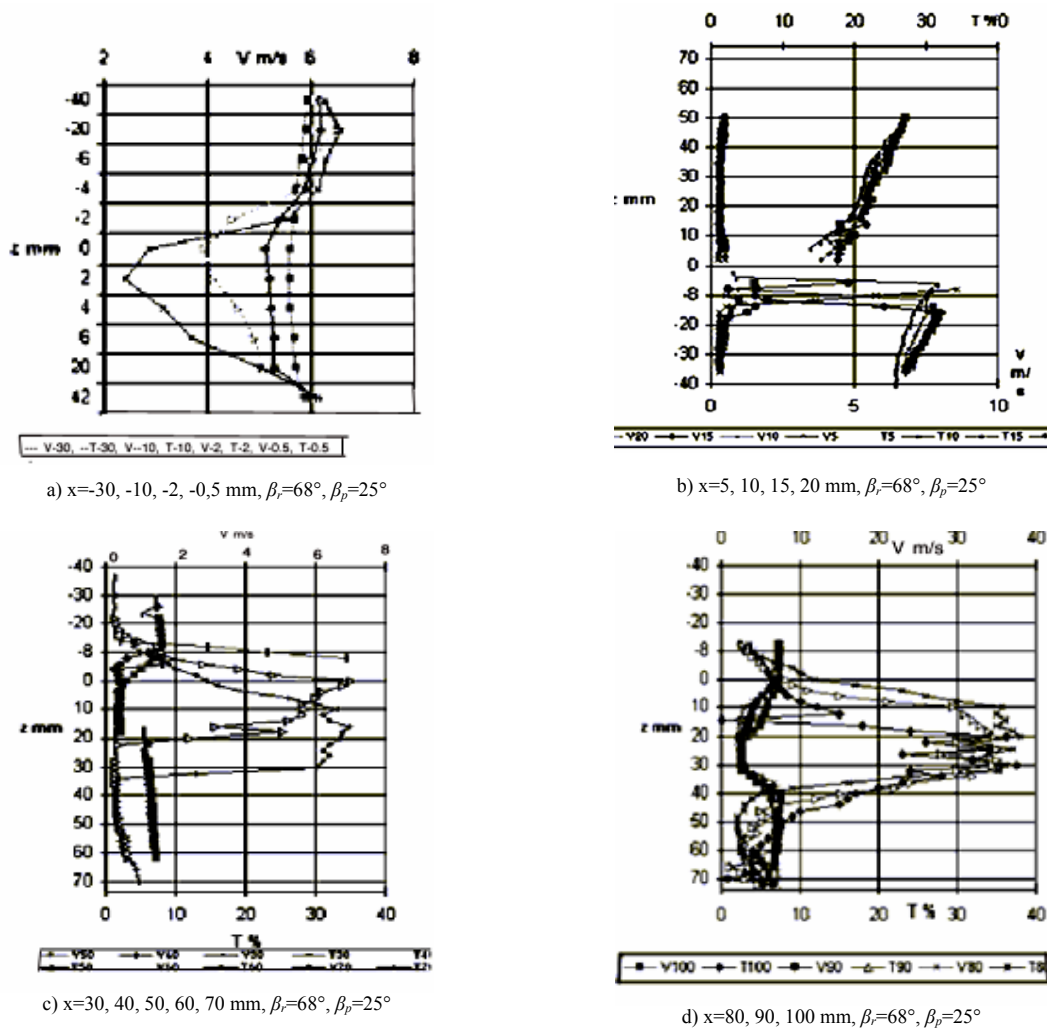
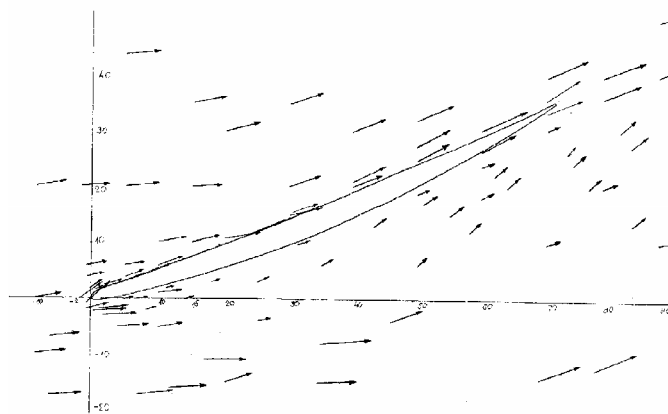
Na sl.8 se može ustanoviti, da je srednji ugao skretanja struje kroz pravu profilnu rešetku oko  $4.5^\circ$ . Teorijski, uglovno skretanje struje u razmatranoj pumpi iznosi  $\Delta\beta = 5.59^\circ$ .

Slike 8a i 8b prikazuju efekte vizualizacije strujanja sa bojama i vazдушnim mehurićima oko profila sa nultim napadnim uglom. Na fotografijama može da se uoči, da je veoma malo skretanje struje iza rešetke, i da profil unosi relativno mali poremećaj u strujno polje.

*Analiza rezultata za  $\beta_r = 68^\circ$  i  $\beta_p = 25^\circ$*

Dijagrami na slikama 9 (a,b,c,d), prikazuju promene vrednosti brzine po vertikalnoj osi ( $z$ ) za različite preseke po tetivi profila, kada je profil postavljen pod napadnim uglom od  $25^\circ$ , a ugao rešetke u odnosu na pravac strujanja  $68^\circ$ . Profil «prima» strujanje na grudnom delu, pa je zbog toga postavljen tako, da je leđna strana okrenuta prema dole (negativne vrednosti za osu  $z$ ).

Asimetričnost strujanja u predelu ispred rešetke, koja se javlja zbog velikog napadnog ugla, je očigledan. Minimalna vrednost brzine strujanja je izmerena u tački sa koordinatama  $z=2$  mm i  $x=-0.5$  mm (9a). Na dijagramu, sa sl.9b vidi se da je brzina strujanja veća oko leđne strane profila za preseke sa  $x=5-20$  mm, a da je skoro izjednačena za  $x=30-70$  mm (9c). Zaustavna tačka se nalazi oko tačke sa  $x=5$  mm, jer je tu izmerena najmanja vrednost brzine strujanja. Na dijagramu sa sl.9b se uočava nagli pad brzine i povećanje turbulencije za tačke sa  $x=15$  mm, što signalizira da se u ovom području javlja otcepljenje struje i začetak turbulentnog «džepa» na leđnoj strani profila. Merenja pokazuju da je za preseke sa  $x=30-70$  mm, (7c),

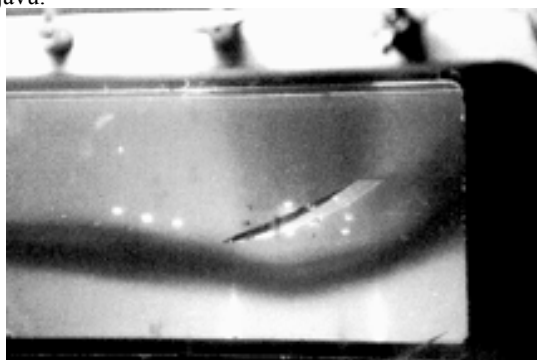
Slika 9. Raspodela brzine i turbulencije oko profila za  $\beta_r = 25^\circ$  i  $\beta_p = 68^\circ$ Slika 10. Mapa vektora verzine strujanja oko profila za  $\beta_r = 25^\circ$  i  $\beta_p = 68^\circ$ 

karakteristično strujanje sa visokom turbulencijom koja dostiže vrednosti  $\approx 35\%$ . Na sl.9d su predstavljena merenja u zoni turbulentnog strujanja. Sa dijagrama se može zaključiti, da se zona turbulencije nalazi između  $z=0$  do  $z=45 \text{ mm}$ , po visini, a počinje u tačkama sa  $x=15 \text{ mm}$  i

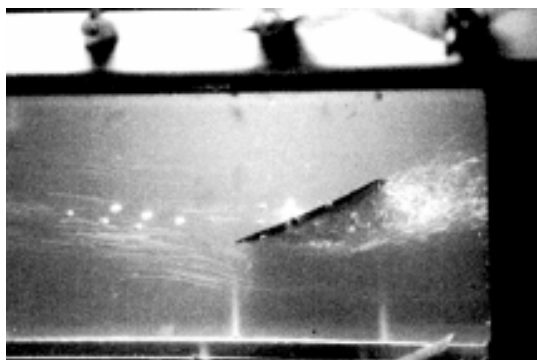
prostire se uz struju. U ovoj oblasti brzina pada do  $2 \text{ m/s}$ . U području izvan turbulentne zone, brzina dostiže vrednost od  $78 \text{ m/s}$ , a turbulencija opada i iznosi  $\approx 1\%$ . Uglovno skretanje struje (sl.10) iznosi  $\approx 20^\circ$ . Raspored vektora brzine (sl.10) u zoni turbulentnog džepa je karakterističan za ovu



pojavu.



a)



b)



c)

**Slika 11.** Vizualizacija strujanja oko profila za  $\beta_r=25^\circ$  i  $\beta_i=68^\circ$ , sa anilinskim bojama (a) i vazдушnim mehurićima (b i c)

Slike 11 (a,b,c) su još jedan dokaz za postojanje područja izrazitog turbulentnog strujanja. Skretanje obojene strujnice obeležava rubove turbulentne zone. Metoda vizualizacije, koja koristi vazdušne mehuriće, daje još efektnije rezultate. Sl.11b vizualizira strujanje za brzinu neporemećene struje  $V_\infty=1.7$  m/s, a 11c za  $V_\infty=3.5$  m/s. Za veće brzine ( $V_\infty=5.3$  m/s) dolazi do difuzije i širenje obojene strujnice, što umanjuje efekte vizualizacije. Pri ovoj brzini, zbog potpripiska koji se javlja, usisava se velika količina vazдушnih mehurića i veoma brzo se zamuti vidno polje oko profila, što takođe umanjuje efekte vizualizacije.

## Zaključak

U ovom radu je prikazan deo rezultata ispitivanja karakteristika brzohodne osne pumpe, preko njene prave profilne rešetke. Osnovni cilj ispitivanja je bio da se odredi mapa vektora brzine strujanja kroz pravu profilnu rešetku, što je realizovano i prikazano na priloženim fotografijama i dijagramima.

Zbog dimenzija i konfiguracije radnog dela vodenokavitacionog tunela, nije bilo moguće napraviti model prave profilne rešetke za ispitivanu osnu pumpu u razmeri 1:5 i postaviti ga pod uglom od  $22^\circ$  u odnosu na pravac strujanja, kako bi se simulirali realni uslovi. U okviru ovog ispitivanja izabrani su, u jednom delu, realni uslovi strujanja u osnoj pumpi ( $\beta_r=90^\circ$ ,  $\beta_{rp}=0^\circ$ ), a u drugom delu ekstremni uslovi strujanja ( $\beta_r=68^\circ$ ,  $\beta_{rp}=25^\circ$ ).

Primena LDA metode i u ovom slučaju je omogućila merenje brzine strujanja bez unošenja poremećaja u strujno polje. Metoda ima etalonsku tačnost i nezavisna je od temperature i pritiska fluida. Vizualizacija strujanja je omogućila dopunska saznanja o prirodi strujanja i potvrdila sliku, koja se o ovom strujanju dobijaju analizom mape vektora brzine strujanja, dobijenu LDA metodom.

Ispitivanje karakterističnih veličina prave profilne rešetke, kao što su hidraulični stepen korisnosti, koeficijent opterećenja, sile koje deluju, koeficijent otpora, uzgona i pritisaka i nivo povezivanja sa radnim karakteristikama osne pumpe, biće predmet budućih istraživanja.

## Literatura

- [1] WATRASIEWICH,B.M., RUDD,J.J. *Laser Doppler Measurements*. London-Boston, Butterworths, 1976.
- [2] RISTIĆ,B. *Pumpe i ventilatori*. Naučna knjiga, Beograd, 1987.
- [3] VORONJEC,K, OBRADOVIĆ,N. *Mehanika fluida*. Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
- [4] RISTIĆ,S., VITIĆ,A., GROZDANOVSKI,D. *Baždarenje vodenokavitacionog tunela i merenje raspodele brzine strujanja po tetivi krila pomoću LDA*, Vazduhoplovstvo, '93, zbornik radova, dec.1993, 9-10, Beograd.
- [5] RISTIĆ,S., ILIĆ,J. *Merenje brzine strujanja u modelima krvnih sudova*. zbornik radova, ETRAN, juni, 1995, Zlatibor.
- [6] MERZKIRCH,W.F. *Flow Visualization*. 1st ed. Academic Press, New York, 1974.
- [7] SETTLES,G.S. *Modern Developments in Flow Visualization*. AIAA Paper 84-1599, June 25-27, 1984, 1-16.
- [8] YANG,W.J., ed. *Flow Visualization III* proc. 3rd International Symposium, Ann Arbor MI, Hemisphere, New York, 1985.
- [9] RISTIĆ,S. Vizualizacija strujanja u aerodinamičkim tunelima, *Glasnik RV i PVO*, 1990, no.1, p.16-24.
- [10] RISTIĆ,S. Laser Doppler anemometrija, *Vojnotehnički glasnik*, 1991, no.5, p.529-536.
- [11] RINKEVIČJUS,B.S. *Lazernaja anemometrija*. Energija, Moskva, 1978.
- [12] BUCHHAVE,P. Tree Component LDA Measurements. *DISA Information*, 1984, no.29, p.3-10.
- [13] RISTIĆ,S. Vizualizacija strujanja, pogled u nevidljivog. *Aeromagazin*, 1998, no.2,3,4.
- [14] RISTIĆ,S., VITIĆ,A. *Analysis of the Accuracy of the Third Component of Flow Velocity Measurements for a 3-component, 3-color Laser Doppler Anemometer*. 21. Congress of the ICAS, 1998, 13-18 sept. Melbourne, Australia.

Rad primljen: 8.9.2000.god.