

UNIVERZITET "VELJKO VLAHOVIĆ" - TITOGRAD  
M A Š I N S K I F A K U L T E T

VUKOSLAVČEVIĆ PETAR

RAZVOJ ANEJOMETARSKIH SOND I SA X-VLAKNIMA I ODGOVARAJUĆIH  
METODA MJERENJA LONGITUDINALNIH KOMPONENTI VRTLOŽNOSTI I  
BRZINE PRI TURBULENTNOM STRUJANJU FLUIDA

- Doktorska disertacija -

Titograd, 1981.godine

532.612.4.173/612.2



Man IV 416

1973

# S A D R Ź A J

Uvod.....	1
1. Pregled dosadašnjih rezultata mjerenja vrtloga....	4
2. Konstrukcija i kalibracija sonde.....	9
2.1 Konstrukcioni parametri sonde.....	9
2.2 Kalibracija sonde.....	12
2.2.1 Odredjivanje zakona hladjenja.....	12
2.2.2 Korekcija usled promjene sobne temperature.....	17
2.2.3 Ispitivanje termalne kontaminacije.....	18
2.2.4 Eksperimentalno odredjivanje konstanti $A_i$ i $n_i$ ....	22
2.2.5 Eksperimentalno odredjivanje efektivnih uglova $\alpha_{ei}$ i konstanti $B_i$ .....	25
2.2.6 Eksperimentalno odredjivanje koeficijenata blokira- nja $k_{pi}$ .....	28
3. Mjerenje brzine i komponente vrtloga u glavnom pra- vcu strujanja.....	29
4. Analiza uticaja gradijenata brzine.....	37
5. Procjena veličine vrtloga $\omega_x$ u turbulentnom grani- čnom sloju.....	47
6. Odredjivanje vjerovatnoće pojave greške pri mjerenju $\omega_x$ usled zanemarivanja transv. komponenata brzine	52
6.1 Konstrukcija i kalibracija sonde za istovremeno mje- renje sve tri komponente brzine... ..	52
6.2 Analiza izraza za odredjivanje greške.....	59
Zaključak.....	64
Literatura.....	68
Dodatak br.1 .....	72
Dodatak br.2 .....	79
Dodatak br.3 .....	85
Dodatak br.4 .....	89

## O Z N A K E

$A_i, B_i$	- konstante u zakonu hlađenja (2.6)
$C_1, C_2$	- konstante u izrazu (2.15)
$D_i = B_i (\cos \alpha_{ei})^{n_i}$	- konstanta
$d$	- prečnik senzora
$E$	- pad napona duž senzora
$E_m$	- pad srednjeg napona (osrednjenog po vremenu) duž senzora
$e$	- fluktuacija napona
$h$	- rastojanje između senzora
$k$	- koeficijent uticaja tangentne komponente hladj.
$k_p, k_i, k_o$	- koeficijenti aerodinamičkog blokiranja
$l$	- dužina senzora
$n_i$	- eksponent u zakonu hlađenja (2.6)
$p(\xi_{\omega_x})$	- vjerovatnoća pojave greške pri mjerenju vrtloga usled zanemarivanja uticaja transvezalnih komponentata brzine
$P_1, P_2, P_3$	- funkcije u izrazu (4.7)
RMS	- srednja kvadratna vrijednost fluktuajuće komp. u
$S_1, S_2$	- konstante u izrazu (5.2)
$t$	- sobna temperatura, vrijeme
$t_R$	- referentna temperatura
$T_a$	- temperatura fluida (2.1)
$T_w$	- temperatura senzora (2.1)
$T$	- vremenski interval mjerenja
$u, v, w$	- fluktuajuće komponente brzine
$U_o, v_o, w_o$	- komponente brzine u centru sonde
$U_m$	- srednja brzine u glavnom pravcu strujanja (osrednjena po vremenu)



$U$	- komponenta brzine u glavnom pravcu strujanja
$U_{\infty}$	- brzina na spoljašnjoj granici graničnog sloja
$U'$	- srednja kvadratna vrijednost komponente brzine u glavnom pravcu strujanja
$U^+ = \frac{U_m}{U_\tau}$	- bezdimenziona brzina
$U_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$	- brzina
$\vec{V}$	- vektor proizvoljne brzine strujanja
$x, y, z$	- koordinate koordinatnog sistema učvršćenog za sondu
$x', y', z'$	- koordinate koord. sistema učvršćenog u prostoru (strujnom polju)
$y^+ = \frac{y U_\tau}{\nu}$	- bezdimenziona koordinata rastojanja od zida
$\alpha_i$	- ugao nagiba senzora
$\alpha_{ei}$	- efektivni ugao nagiba senzora
$\theta$	- ugao rotacije sonde u horizontalnoj ravni
$\varphi$	- ugao rotacije sonde u vertikalnoj ravni
$\omega_x$	- komponenta vrtloga u glavnom pravcu strujanja
$\omega_x'$	- srednja kvadratna vrijednost komponente vrtloga u glavnom pravcu strujanja
$\epsilon_{\omega_x}$	- greška pri mjerenju komponente vrtloga $\omega_x$ usled zanemarivanja transvezalnih komponentata brzine
$\epsilon_v$	- standardna devijacija razlike teorijskog i eksperimentalnog zakona promjene $E = f(U)$
$\eta$	- kolmogorova razmjera
$\nu$	- kinematska viskoznost
$\tau_w$	- napon smicanja na zidu
$\rho$	- gustina fluida

## U V O D

Rejnoldsove jednačine koje opisuju turbulentno strujanje, dobijene osrednjavanjem po vremenu jednačina koje definišu laminarno strujanje, sadrže dodatne članove kao posledicu razdvajanja promenljivih na njihove prosječne i fluktuirajuće vrijednosti. Ovi članovi poznati kao Rejnoldsovi turbulentni naponi, zahtijevaju dodatne relacije izmedju turbulentnih napona i prosječnih vrijednosti promenljivih u cilju dobijanja zatvorenog sistema jednačina. Ovo je, naravno, dobro poznat problem od kraja prošlog vijeka kada je Reynolds, razdvajajući veličine strujnog polja na njihove prosječne i fluktuirajuće komponente, dobio otvoren sistem jednačina koje opisuju turbulentno strujanje. Fizički zakoni iz kojih bi proizišle dodatne relacije, kojima bi se ovaj sistem jednačina zatvorio, su nepoznate. Razvijene su različite teorije analogno molekularnim difuzionim procesima, medju kojima su najpoznatije Prandtlova, Karmanova i Tejlorova. One su dovele do pojave tzv. turbulentne viskoznosti koja nije karakteristika fluida, već varira u prostoru, kao i od jednog do drugog slučaja strujanja. Dobijeni rezultati su ipak našli široku primjenu pri rješavanju relativno jednostavnih tehničkih problema, dok su opšte jednačine turbulentnog strujanja ostale i dalje otvorene.

Poznato je već dugo vremena da je polje vrtloga od veoma velikog značaja za analizu turbulentnog strujanja, o čemu je detaljno pisao Lightill [1], dok Willmarth u svome pregledu turbulentnog graničnog sloja [2] tvrdi, pored ostalog, da struktura turbulentnog strujanja ne može biti lako razjašnjena bez koncepcije vrtloga. U jednom članku [3], koji se pojavljuje u isto vrijeme kad i Willmarth-ov, Laufer iznosi mišljenje da je mjerenje vrtloga metod koji najviše obećava u cilju analize turbule-

ntnog strujanja. Soffman [4] sugeriše da ključ turbulencije možda leži u otkrivanju procesa vrtložne interakcije.

Vizuelni, kao i eksperimenti, bazirani na anemometarskoj tehnici, izvršeni u toku poslednjih dvadeset godina, pokazali su da je koherentna vrtložna struktura prisutna u turbulentnom strujanju. Vizuelne studije koje su izveli Kline, Reynolds, Schraub i Runstadler [5], Kim, Kline i Reynolds [6], Nychas, Hersheu i Brodkey [7], kao i Offen i Kline [8], pokazale su prisutnost koherentne vrtložne strukture na različitim rastojanjima od zida. Ispitivanja dvodimenzionog medjusloja koja su izvršili Brown i Roshko [9], kao i Winant i Browand [10], takodje su potvrdila postojanje gore navedenih struktura. Do istog zaključka su došli i Laufer [11], Pappalio i Lukoudis [12], Townsend [13], Bakewell i Lumley [14], Willmarth i Tu [15], Gupta [16], Kastinakis, Wallace i Willmarth [17], Blackwelder i Eckelmann [18], kao i niz drugih istraživača.

Svi oni su jasno utvrdili da turbulentno strujanje, daleko od toga da bude potpuno haotično, sadrži u sebi određene koherentne strukture. U oblasti u blizini zida, gdje je generacija i disipacija turbulencije najintenzivnija, strujanje pokazuje karakteristike uredjenosti koje su povezane sa pojavom visokih Reynoldsovih napona. U slobodnom vrtložnom strujanju su uočeni vrtlozi velikih razmjera i analizirani kao mogući izvori buke. Uredjene strukture se, međutim, pojavljuju na proizvoljnim lokacijama u prostoru i vremenu. Prema tome, mjerenje u jednoj tački strujnog polja koristeći anemometarsku tehniku (zagrijano vlakno) daće signal koji će imati oblik proizvoljne funkcije, jer je sonda naizmjenično izložena koherentnim i proizvoljnim strukturama strujnog polja. S druge strane, vizuelni rezultati su nepogodni za bilo kakvu sistematsku analizu. U cilju prevazilaženja problema razvijene su različite detekcione šeme, pomoću kojih se

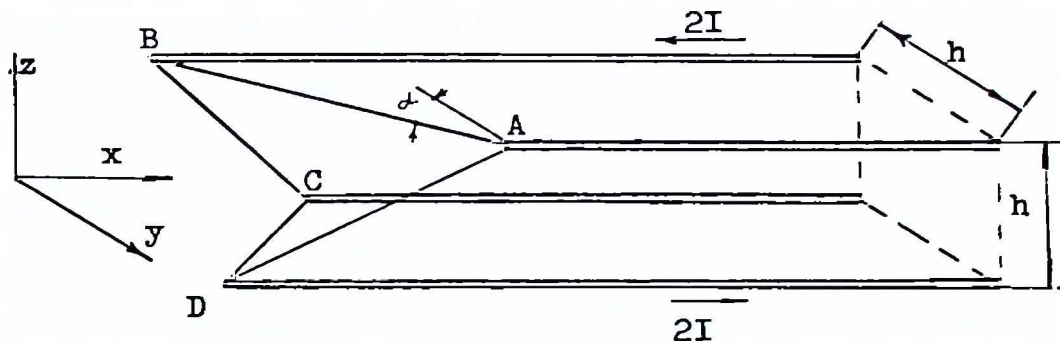
iz dobijenog signala može izvući zaključak o karakteru koherentnog strujanja. Teži se ka dobijanju dovoljno podataka o odgovarajućoj koherentnoj strukturi, u cilju analize dinamičkog procesa nastajanja i disipacije iste, što bi vodilo odgovarajućim fizičkim i matematičkim modelima, pomoću kojih bi se zatvorio sistem jednačina koje opisuju turbulentno strujanje. Opšte mišljenje je da je ovo najbolji put za rješavanje problema strujanja u graničnom sloju, cijevima i kanalima.

Fizički model koji najbolje odgovara svim dosadašnjim eksperimentima je vrtložna linija u obliku konjske potkovice u blizini zida. Po ovom modelu se vrtložna linija, stvorena na zidu, prvo podiže, a zatim biva nošena nizvodno. Početni položaj vrtložne linije u pravcu normalnom na glavno strujanje biva reorjentisan u pravcu glavnog strujanja, što ima za posledicu parove vrtloga sa suprotnim smjerovima obrtanja. Ovi parovi međusobno utiču na svoje dalje kretanje i deformisanje. Oni skupljaju fluid koji ima relativno nisku količinu kretanja u blizini zida i podižu ga, izazivajući intenzivnu razmjenu količine kretanja i, prema tome, visoke Reynoldsove napone. Nažalost, direktno mjerenje ovih vrtloga na pouzdan način još nije izvršeno.

Jedna nova teorija koju je razvio Bernard [41] u cilju zatvaranja jednačina turbulentnog strujanja, bazirana je na vrtložnom strujnom polju. Pozitivni početni rezultati ukazuju na neophodnost daljeg razvijanja mjerne tehnike koja bi omogućila direktno mjerenje vrtloga i, samim tim, dalje razvijanje i analizu gore navedenih modela ili eventualno usvajanje nekih novih.

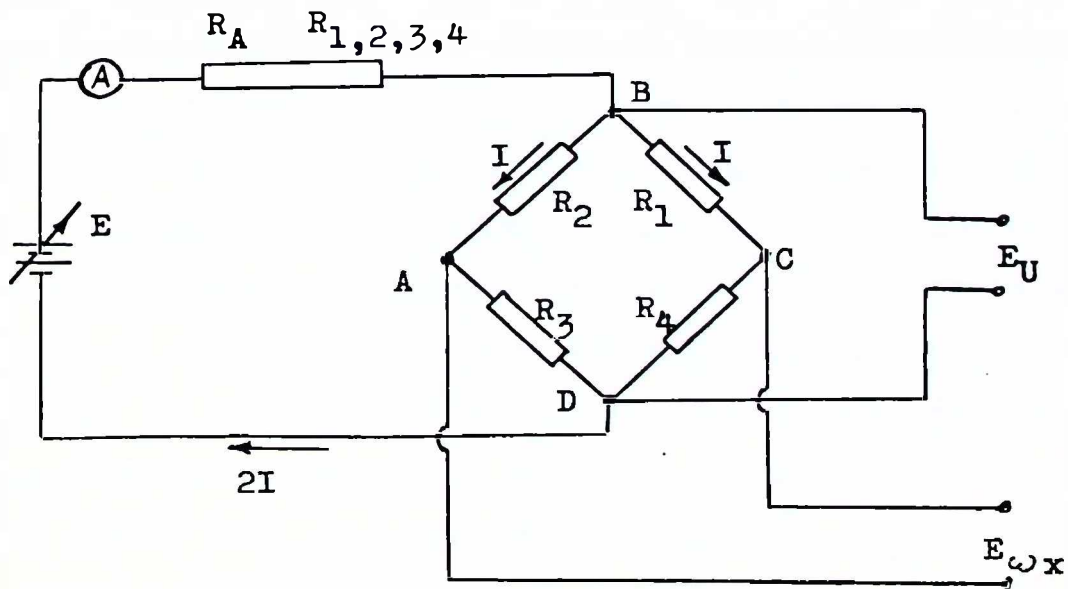
## 1. PREGLED DOSADAŠNJIH REZULTATA MJERENJA VRTLOGA

Svi dosadašnji rezultati su uglavnom dobijeni upotrebom tzv. Kovasznay-tip sonde za mjerenje vrtloga. Kovasznay je 1950 god. predložio sondu sa četiri senzora (zagrijana vlakna) učvršćena na četiri nosača. Ova sonda, prikazana na sl.1, je predviđjena za mjerenje longitudinalne komponente vrtloga  $\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}$  kao i longitudinalne komponente brzine  $U_m + u$  [19], [20].



sl.1

Sonda se postavlja tako da joj se uzdužna osa poklapa sa glavnim pravcem strujanja. Senzori se zagrijevaju pomoću električnog kola koje obezbjeđuje konstantnu struju sl.2.



sl.2

Smatra se da, ako je sonda konstruisana potpuno simetrično u geometrijskom i električnom pogledu, tj. ako svi senzori zaklapaju iste uglove  $\alpha$  sa pravcem  $y$  odnosno  $z$  i ako su svi identični, onda je pad napona izmedju tačaka B i D funkcija longitudinalne komponente brzine  $U_m + u$ , a pad napona izmedju tačaka C i A funkcija je longitudinalne komponente vrtloga  $\omega_x$ . Uticaj transvezalnih komponenta brzine  $v$  i  $w$  u pravcu osa  $y$  i  $z$  na mjerene veličine je zanemarivan. Gore navedene funkcije, najčešće linearnog oblika, su odredjivane eksperimentalnim putem. Sonda je rijetko korišćena zbog teškoća na koje se nailazilo pri njenoj konstrukciji: da bude dovoljno malih dimenzija u cilju mjerenja najmanjih vrtloga, a da pri tome zadovolji uslove simetričnosti kako bi se izbjegla pojava lažnih signala.

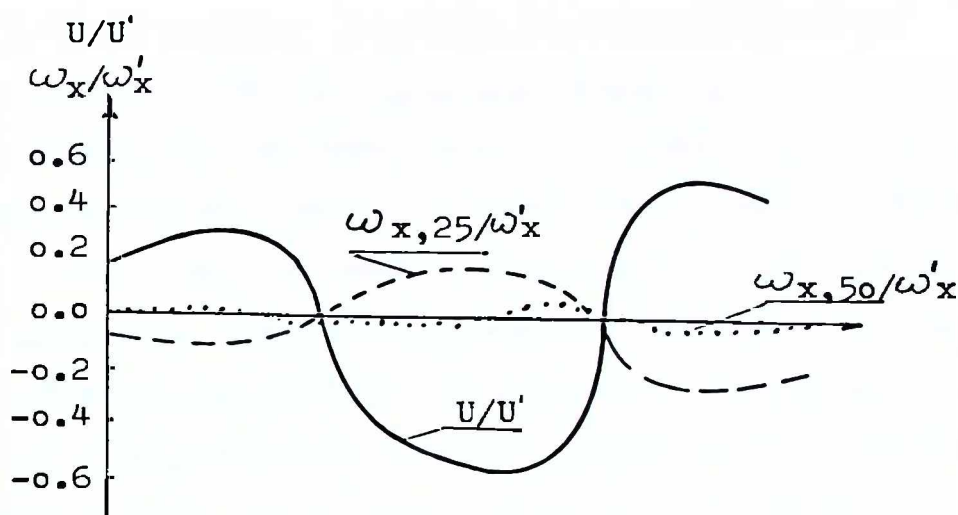
Prvi su je primjenili Uberoi i Corrsin [21] za proučavanje pojave turbulencije pri prelazu laminarnog u turbulentno strujanje. Oni su kalibrisali sondu na taj način što su je obrtali različitim ugaonim brzinama u uniformnoj struji i tako odredili vezu izmedju pada napona  $E_{CA}$  i ugaone brzine, odnosno vrtloga  $\omega_x$ . Ovakav postupak kalibracije, iako po svojoj suštini jednostavan, zahtijeva upotrebu složenog uređaja za okretanje sonde i odvođenje signala preko kliznih ležajeva ispunjenih živom. Kistler [22] je analizirao osjetljivost sonde na različite strujne parametre. On je utvrdio da je pad napona  $E_{CA}$  zavisao od poprečnih komponenta strujanja pri čemu osjetljivost zavisi od ugla nagiba senzora  $\alpha$  prema osi  $y$  odnosno  $z$ . On je smatrao da je ovaj nepoželjni uticaj zanemarljiv u struji sa relativno malim poprečnim komponentama, kakvo je uglavnom turbulentno strujanje kod koga je samo jedna srednja komponenta brzine (npr.  $U_m$ ) različita od nule. Corrsin i Kistler [23] su takodje koristili ovu sondu za proučavanje dinamike slobodnih graničnih površina turbulentnog strujanja. Pored upotrebe iste u ci-



lju indikacije pojave turbulencije, oni su izmjerili i srednju kvadratnu vrijednost longitudinalne komponente vrtloga na različitim rastojanjima od zida. Vjerovali su da je sonda neosjetljiva na poprečne komponente brzine strujanja, na osnovu testova koje su izvršili u strujanju sa niskim stepenom turbulencije. Kastrinakis, Eckelmann i Wilmarth [24] su pokazali da je gornja pretpostavka tačna samo za određeni položaj sonde prema poprečnim komponentama. Imajući u vidu da se položaj sonde pri mjerenju ne mijenja, a da ove komponente stalno mijenjaju svoj pravac, smjer i intezitet, očigledno je da je prisutnost određenog lažnog signala neizbježna. Wilmarth i Lu [25] su prezentirali rezultate mjerenja korelacije između  $\omega_x$  i  $U$  u turbulentnom graničnom sloju pri velikim brzinama strujanja. Oni su istakli da je sonda koju su koristili bila relativno velika u poredjenju sa najmanjim vrtlozima koji se pojavljuju u takvom strujanju. Wyngard [26] je analizirao dimenzije ove i drugih sonde sa više senzora i predložio uslove koje sonda mora zadovoljiti da bi mogla mjeriti najmanje vrtloge u odgovarajućem strujanju. Kastrinakis [27] i Kastrinakis i dr. [17] su koristili dvije od ovih sonde u neposrednoj blizini zida pri turbulentnom strujanju u kanalu u cilju mjerenja odgovarajućih korelacija. Oni su ustanovili da se pojavljuje pad napona između tačaka A i C kao posledica promjene longitudinalne komponente brzine  $U$ , što se manifestovalo kao lažan signal za  $\omega_x$ . Koristeći posebni postupak koji su sami razvili, uspjeli su da ovaj lažni uticaj koriguju. Takodje su ustanovili da se pojavljuje lažni signal kao posledica uticaja transvezalnih (poprečnih) komponenta brzine  $v$  i  $w$ . Nisu uspjeli da izvrše korekciju ovog uticaja, jer je sondom ovog tipa nemoguće mjeriti komponente brzine  $v$  i  $w$ . Medjutim, zbog simetrije lažnog signala, oni su smatrali da se srednje vrijednosti neparnih momenata  $\omega_x$ , kao i  $\omega_x$  i kombinacije dru-

gih strujnih parametara, mogu tačno mjeriti, jer bi greška u tom slučaju trebalo da se poništi.

Na sl.3 je prikazan osrednjeni skup uzoraka funkcije  $U(t)$  koji imaju zajedničku karakteristiku pojave naglog ubrzanja kome predhodi lagano usporenje; ovo su dobili Wallace, Brodkey i Eckelmann [42].



sl.3

Kad je jedan uzorak, gore navedenog oblika, nadjen u  $U$  signalu,  $\omega_x$  signal je istovremeno osrednjivan koristeći istu tehniku u istom vremenskom intervalu u dvema različitim pozicijama. Na slici su prikazana dva uzorka za  $\omega_x$  na rastojanju od 25 i 50 viskoznih dužina. Na rastojanju od 25 dužina uzorak za  $\omega_x$  nije u fazi sa uzorkom za  $U$ , a na rastojanju od 50 visk. dužina gotovo je jednak nuli. Ovo je u skladu sa hipotezom o postojanju vrtložne linije u obliku konjske potkovice u blizini zida, o čemu je bilo riječi u uvodnom dijelu ovog rada. Rezultati su dobijeni upotrebom velikog broja podataka, pa su autori očekivali da će zbirni uticaj transvezalnih komponenata brzine na rezultate mjerenja biti jednak nuli.

Mjerenje parnih momenata (npr. srednje kvadratne vrijednosti) ovakvom sondom, krajnje je nepouzđano, zbog mogućnosti akumulacije



greške. Isto tako, imajući u vidu da prema nekim od dosadašnjih rezultata [24] trenutna greška može biti istog reda veličine kao i mjereni signal, postavlja se pitanje pouzdanosti pretpostavke o poništenju zbirne greške pri mjerenju neparnih momenata.

Kastrinakis, Eckelmann i Wilmarth [24] su ispitivali eksperimentalnim i analitičkim putem uticaj transvezalnih komponenata na grešku pri mjerenju  $\omega_x$ . Oni su predložili da je, u cilju korigovanja ovog uticaja, potrebno izraditi sondu istog geometrijskog oblika, ali na takav način da svaki senzor bude uključen u posebno električno kolo. To znači da bi, umjesto četiri, ovakva sonda trebalo da ima ukupno osam nosača. Ovo svakako povećava problem izgradnje sonde dovoljno malih dimenzija jer sada, za razliku od predhodnih slučajeva, treba umjesto četiri smjestiti osam nosača na dovoljno malom prostoru. Time se već postojeći problem izrade još više komplikuje. Pored toga treba očekivati intezivniji uticaj aerodinamičkih efekata usled intezivnijeg blokiranja strujanja. Ovakva sonda bi predstavljala kombinaciju dvije X-sonde smještene u normalnim ravnima sa presjekom paralelnim glavnom pravcu strujanja. Pod uobičajenim pretpostavkama koje važe za X-sonde sve tri komponente brzine bi mogle biti mjerene, što bi omogućilo analizu njihovog uticaja na signal za  $\omega_x$ , njegovo određivanje i razvijanje postupka za korekciju.

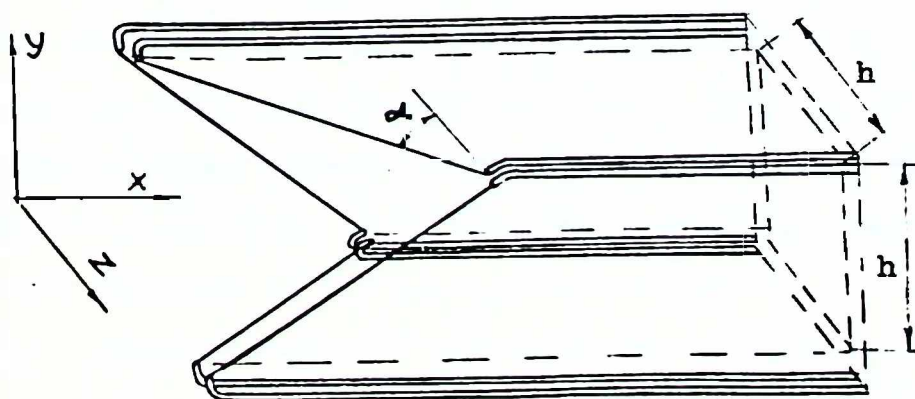
Prva sonda ovakve vrste je izradjena na univerzitetu u Marylandu, USA i njenu konstrukciju je opisao Cleveland [28]. On je dao izraz za određivanje longitudinalne komponente vrtloga  $\omega_x$  u slučaju kada se uticaj transvezalnih komponenata brzine može zanemariti. Izvršio je testiranje tog izraza rotirajući sondu u uniformnoj struji sa transvezalnim komponentama brzine jednakim nuli. Pokazao je da se, poslije nekoliko korekcija dobijenih podataka, dati izraz može potvrditi eksperimentalnim putem. Detaljnu analizu

postupka za korigovanje podataka nije izvršio, tako da se u njegovu univerzalnost može opravdano sumjati. Isto tako, najvažniji problem sa kojim su se suočili predhodni istraživači tj. uticaj transvezalnih komponenata brzine na mjerenje vrtloga, uopšte nije analiziran. Nema ni podataka o intezitetu aerodinamičkog blokiranja, niti su preduzete neke posebne mjere za njegovo otklanjanje. Prema tome, trebalo je napraviti neku poboljšanu varijantu sonde ovakvog tipa, nastaviti njeno dalje ispitivanje i eventualno potražiti neka nova rješenja ukoliko se dobiju negativni rezultati.

## 2. KONSTRUKCIJA I KALIBRACIJA SONDE

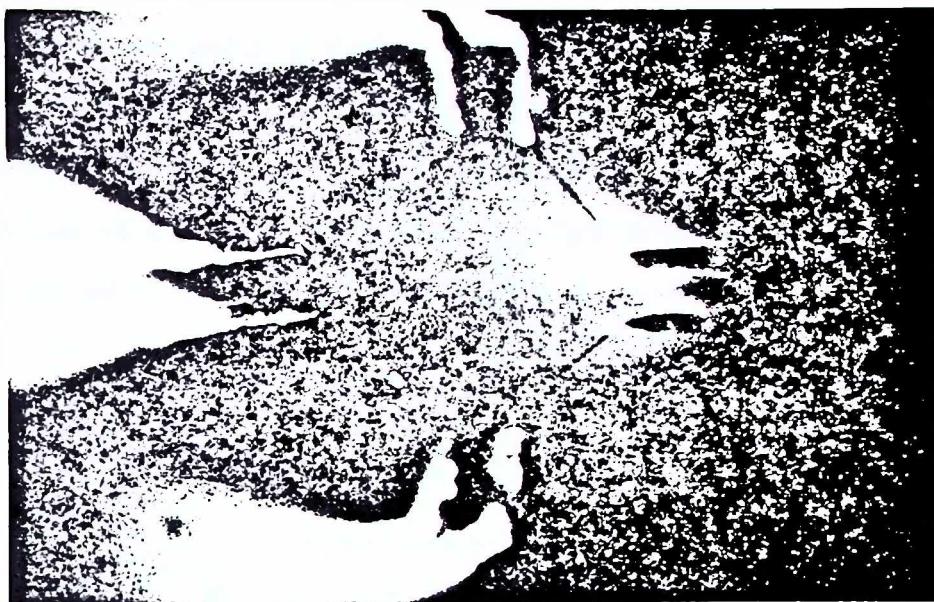
### 2.1 Konstruktivni parametri sonde

U cilju analize uticaja transvezalnih komponenata brzine na mjerenje longitudinalne komponente vrtloga  $\omega_x$  i brzine, konstruisana je sonda prikazana na sl.4 i na fotografiji sl.5.



sl.4

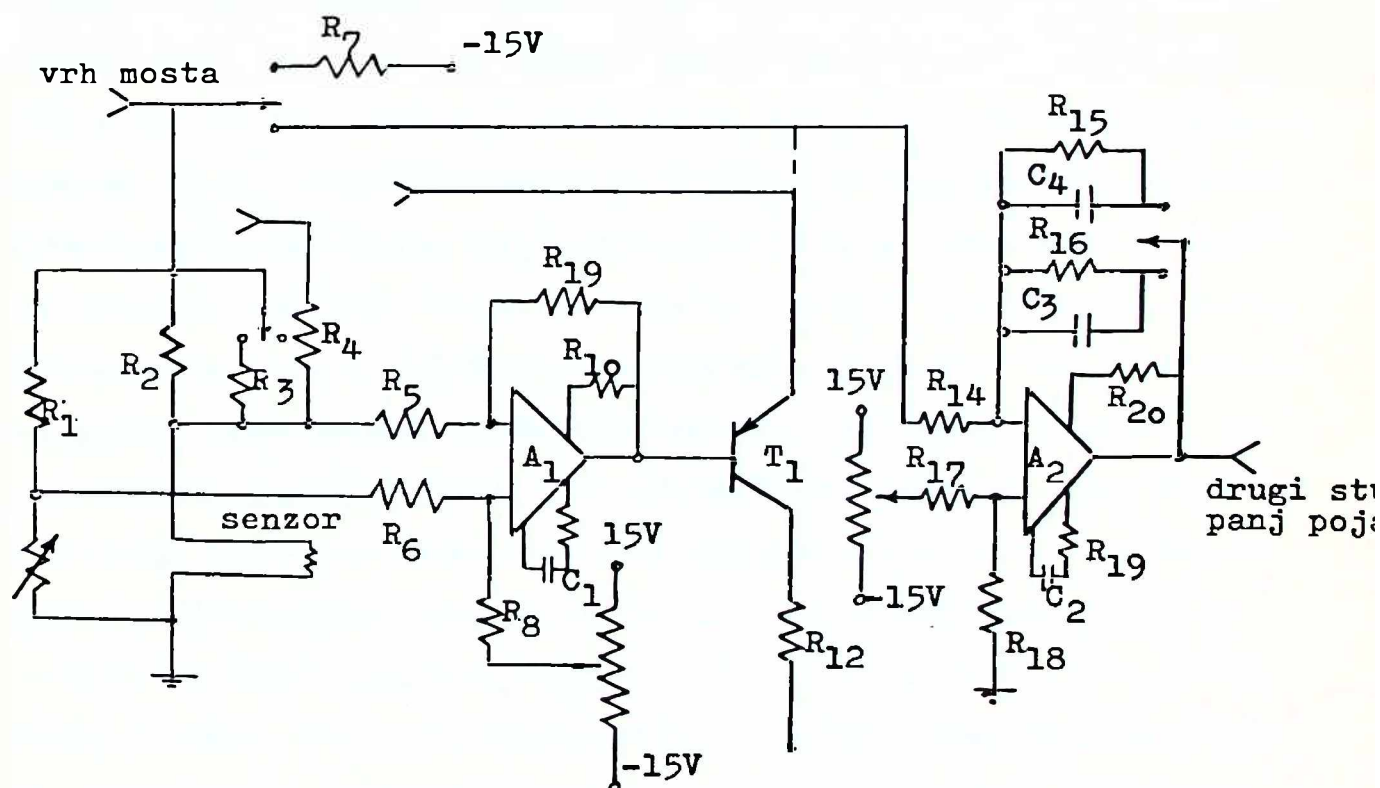
Ugao nagiba senzora označen na sl.4 je u granicama od  $43^\circ$  do  $44^\circ$ , što je utvrđeno mjerenjem na šadografu. Dimenzije sonde su odabrane tako da zadovolje kriterijume koje je definisao Wyngard.



sl.5

Prema tim kriterijumima, ako je odnos Kolmogorove razmjere i dužine senzora  $\lambda/l$ , veći od 0.3 (za slučaj kada je odnos dužine senzora i rastojanja izmedju istih jednak jedinici), onda su dimenzije sonde dovoljno male da bi omogućile mjerenje najmanjih vrtloga. Prečnik senzora je  $2.5 \mu\text{m}$  a njihova dužina 0.70 mm, tako da je odnos njihovih dužina i prečnika oko 290. Rastojanje izmedju ravni u kojima leže senzori je takodje 0.70 mm. Za granični sloj, sa relativno malom brzinom na spoljašnjoj granici ( $U_\infty = 2.6 \text{ m/s}$ ), u kome je ova sonda korišćena, Kolmogorova razmjera je  $\lambda = 0.4 \text{ mm}$

na rastojanju  $y^+ = 15$  (Tennekes i Lumley [29]). Odatle slijedi da je  $\frac{\eta}{\mu} = 0.55$  tj. daleko iznad minimalne vrijednosti koju preporučuje Wyngard. Za razliku od sonde Kovasznay-tipa, ova sonda ima savijene vrhove nosača senzora. To je uradjeno u cilju smanjivanja uticaja aerodinamičkog blokiranja, na bazi kriterijuma definisanih od strane Comte - Bellot, [35] na osnovu kojih je poznato da ako senzor ne leži u ravni svojih nosača, uticaj aerodinamičkog blokiranja će biti sveden na minimum. Svaki senzor je povezan u posebno električno kolo prikazano na sl.6, napravljeno na osnovu originalnog rješenja koje je dao Kaplan a čiju analizu su izvršili Weidman i Browand [32].



sl.6

Stepen pregrijavanja senzora je odredjen otpornicima  $R_2$  i  $R_3$  preko sledećeg odnosa  $\frac{R_2 + R_3}{R_3}$ , kao što se može videti sa date šeme. Otpornici  $R_2$  i  $R_3$  su izmenljivi, tako da se može podesiti odgovarajući stepen pregrijavanja.



## 2.2 Kalibracija sonde

### 2.2.1 Odredjivanje zakona hladjenja

Pad napona duž zagrijanog senzora smještenog u struji fluida je, u opštem slučaju, funkcija vektora brzine  $\vec{V}$ , temperature  $T_a$  i gustine  $\rho$  fluida, kao i temperature senzora  $T_w$ :

$$E = E(V, T_a, T_w, \rho). \quad \dots(2.1)$$

Do danas nije formiran jedinstven stav o obliku ove funkcije, već se kod raznih autora mogu sresti njene različite verzije. Imajući to u vidu posvećena je posebna pažnja njenom izboru.

Kalibracija i mjerenje su vršeni u uslovima relativno male brzine  $|\vec{V}| < 10$  m/s, sa temperaturom vazduha bliskom sobnoj temperaturi. Pod tim uslovima gornja jednačina može biti uprošćena [43], jer je  $\rho = \text{const.}$  a umjesto  $T_a$  i  $T_w$  može se uzeti njihova razlika  $T_a - T_w$ . Vektor brzine je određen u koordinatnom sistemu fiksiranom u prostoru. Pad napona  $E$  zavisi od amplitude i orijentacije tog vektora. Mnogo je zgodnije uvesti koordinatni sistem fiksiran za sondu, kao što je prikazano na sl.4. U toku kalibracije ovaj koordinatni sistem se pomjera zajedno sa sondom u horizontalnoj ravni za ugao  $\theta$  i vertikalnoj ravni za ugao  $\varphi$  i na taj način generišu transvezalne komponente brzine  $v$  i  $w$  kao funkcije ovih uglova. Imajući to u vidu slijedi da je:

$$E = E(|\vec{V}|, \theta, \varphi, T_w - T_a). \quad \dots(2.2)$$

Prema Bruun-u [44] gornja relacija je jedinstvena za dati senzor, zajedno sa odgovarajućim anemometrom. Međutim, kalibracioni rezultati koje je dobilo niz autora, pokazuju da je gornja relacija univerzalna za senzore sonde određenog tipa tj. za različite senzore iste sonde kao i za senzore različitih sonde istog tipa u kombinaciji sa odgovarajućim anemometrom. Ipak je neophodno izvršiti pojedinačnu kalibraciju svakog senzora zbog malih, ali veoma bitnih

razlika u kalibracionim konstantama. Za anemometar sa konstantnom temperaturom, kao što je slučaj u ovom radu, relacija (2.2) se uprošćuje na sledeći oblik

$$E = E(|\vec{v}|, \theta, \varphi) \quad \dots(2.3)$$

ili  $E = E(U, v, w)$ , imajući u vidu da su  $U$ ,  $v$  i  $w$  funkcije vektora  $|\vec{v}|$  i uglova  $\theta$  i  $\varphi$ . U najvećem broju praktičnih problema dovoljno je, u cilju mjerenja sve tri komponente brzine i analiza uticaja aerodinamičkog blokiranja, izvršiti sledeće uprošćene kalibracije [43]:

$$E = f(|\vec{v}|, \theta); \varphi = 0, \quad \dots(2.4)$$

$$E = f(|\vec{v}|, \varphi); \theta = 0. \quad \dots(2.5)$$

Jedan od najčešće upotrebljavanih metoda kalibracije je baziran na analitičkom izrazu koji povezuje napon  $E$  i efektivnu brzinu  $U_e$  koja je funkcija apsolutne vrijednosti brzine  $|\vec{v}|$  i uglova  $\theta$  i  $\varphi$ . Prvi izraz te vrste potiče od Kinga [45] u sledećem obliku:

$$E^2 = A + BU_e^n, \quad \dots(2.6)$$

pri čemu je  $n = 0.5$ , dok prema Collisu i Williams-u [46]  $n = 0.45$  bolje odgovara. Bruun je [47] pokazao da se  $n$  može smatrati konstantnim samo za relativno mali dijapazon promjene brzina, dok se za veće promjene moraju uvesti mnogo komplikovanije funkcije. Bruun i Tropea [43] su ispitivali zavisnost eksponenta  $n$  od brzine i došli do zaključka da se može smatrati konstantnim pri promjeni brzine u intervalu od 10 m/s, što je slučaj sa ispitivanjima sprovedenim u ovom radu. Oni su pored izraza (2.6) ispitivali i sledeće izraze:

$$E^2 = A + BU_e^{0.5} + CU_e, \quad \dots(2.7)$$

$$E^2 = A + BU_e^n + CU_e, \quad \dots(2.8)$$

i zaključili da praktično nema nikakve razlike između izraza (2.6) i (2.8) uz upotrebu optimalne vrijednosti za  $n$ , dok je izraz

(2.7) dao nešto slabije rezultate. Prema tome, dalje je korišćen izraz (2.6), pri čemu je vrijednost eksponenta  $n$  smatrana konstantnom.

Od izraza za efektivnu brzinu  $U_e$  najpoznatiji je tzv. kosinusni zakon:

$$U_e = |\vec{V}| \cos \psi, \quad \dots(2.9)$$

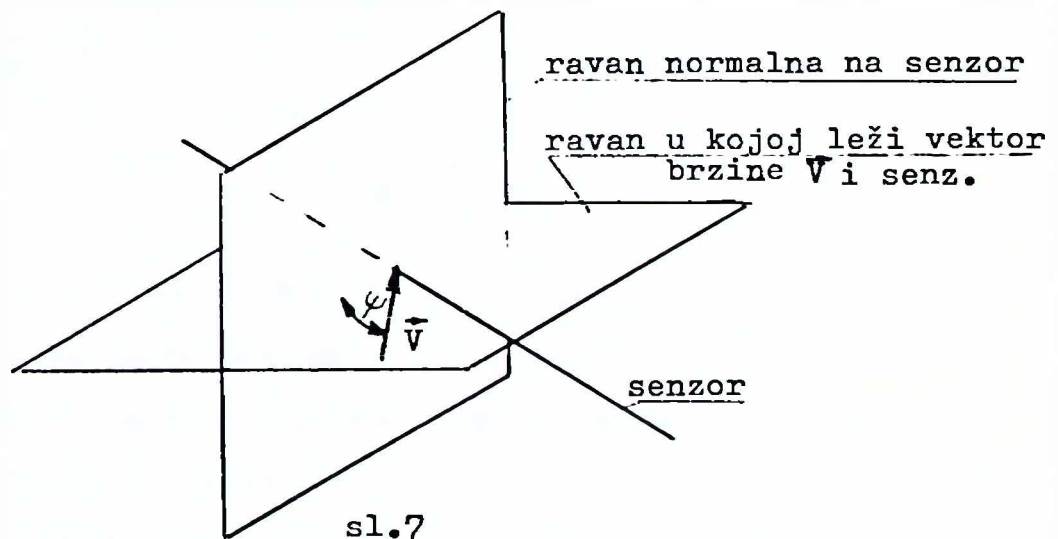
gdje su  $\vec{V}$  i  $\psi$  označeni na sl.7; zatim;

$$U_e = |\vec{V}| (\cos^2 \psi + k^2 \sin^2 \psi)^{0.5}, \quad \dots(2.10)$$

pri čemu se  $k$  smanjuje od  $k = 0.2$  za  $\frac{1}{d} = 200$  do  $k = 0$  za  $\frac{1}{d} = 600$  [40], i konačno

$$U_e = |\vec{V}| [1 - k(1 - \cos^{0.5} \psi)]^2, \quad \dots(2.11)$$

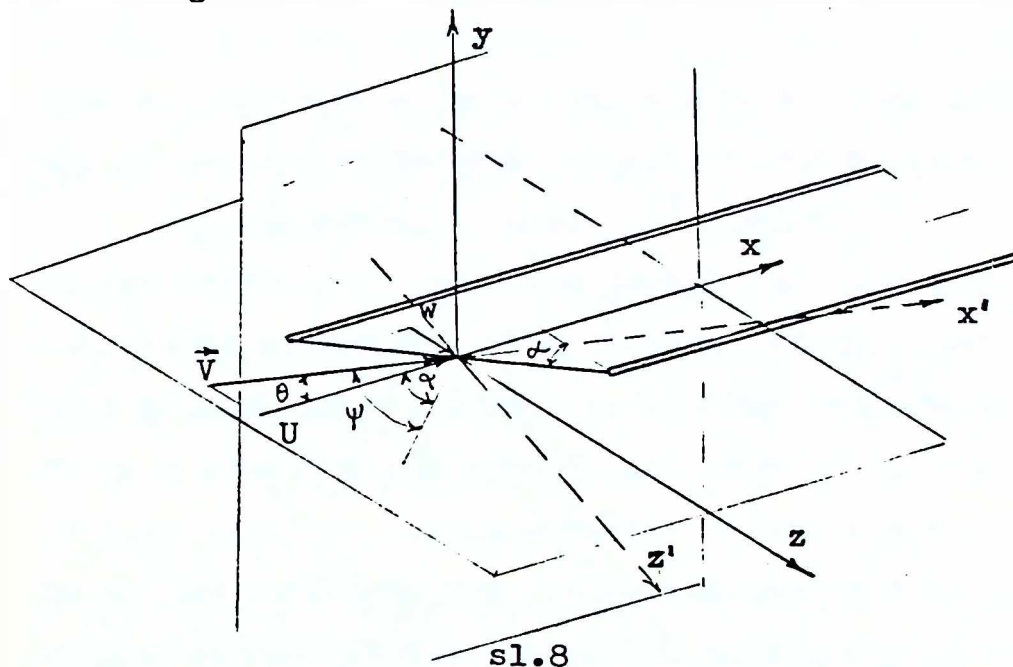
gdje je  $k = 1 - 2600(d/1)^2$  [49].



Niz autora je eksperimentalnim putem ispitivalo gore navedene izraze u kombinaciji sa izrazom (6). Freihe i Schwartz [49] su pokazali da je za dovoljno dug senzor kosinusni zakon (2.9) potpuno tačan. Međutim, zbog ograničene dužine senzora određene devijacije su prisutne. Prema Bradshaw-u [50], dobri rezultati se mogu postići upotrebom kosinusnog zakona uz zamjenu stvarnog ugla  $\psi$  efektivnim uglom  $\psi_e$ , koji se može odrediti eksperimentalnim putem. Isto mišljenje je izraženo i u radu [43] za relativno male vrijednosti promjene ugla  $\psi$ . Imajući u vidu jednostavnost izraza

(2.6), kao i relativno malu promjenu ugla  $\psi$ , prvenstveno je ispitivan kosinusni zakon uz primjenu efektivnog ugla, sa ciljem da se isti primjeni ukoliko se dobiju zadovoljavajući rezultati.

Na sl.8 prikazana je sonda sa kosim senzorom, smještena u jednolikoj struji u pravcu ose  $x$  i nagnuta u horizontalnoj ravni za ugao  $\Theta$  u odnosu na nepokretni koordinatni sistem  $x', y', z'$ .



Na osnovu izraza (2.9) slijedi:

$$U_e = |\vec{V}| (\cos \alpha \cos \theta - \sin \alpha \sin \theta), \text{ odnosno} \quad \dots(2.12a)$$

$$U_e = U \cos \alpha - w \sin \alpha, \quad \dots(2.12b)$$

ili upotrebom efektivnog ugla:

$$U_e = U \cos \alpha_e - w \sin \alpha_e. \quad \dots(2.12)$$

Efektivna brzina je dobijena u funkciji komponenata  $U$  i  $w$  čija se veličina može proizvoljno mijenjati pri kalibraciji izborom odgovarajućeg ugla  $\Theta$ . Dosadašnja mjerenja [33] pokazuju da je vjerovatnoća za  $w > U \tan(15^\circ)$  pri turbulentnom strujanju veoma mala. Prema tome, neophodno je, pri kalibraciji, sondu rotirati za ugao  $\Theta$  u granicama  $-15^\circ \leq \Theta \leq 15^\circ$  u jednolikoj struji čija je brzina jednaka najvećoj srednjoj brzini u glavnom pravcu turbulentnog strujanja za koje je sonda predviđena.



Ukoliko vektor brzine  $\vec{V}$  leži u nekoj ravni pod uglom  $\varphi$  u odnosu na ravan xoy onda će, prema kosinusnom zakonu (2.9), biti:

$$U_e = |\vec{V}| [(\cos \varphi \cos \psi)^2 + \sin^2 \varphi]^{0.5}, \text{ odnosno:}$$

$$U_e = [(U \cos \alpha - w \sin \alpha)^2 + v^2]^{0.5},$$

ili korišćenjem efektivnih uglova:

$$U_e = [(U \cos \alpha_e - w \sin \alpha_e)^2 + v^2]^{0.5}. \quad \dots(2.13)$$

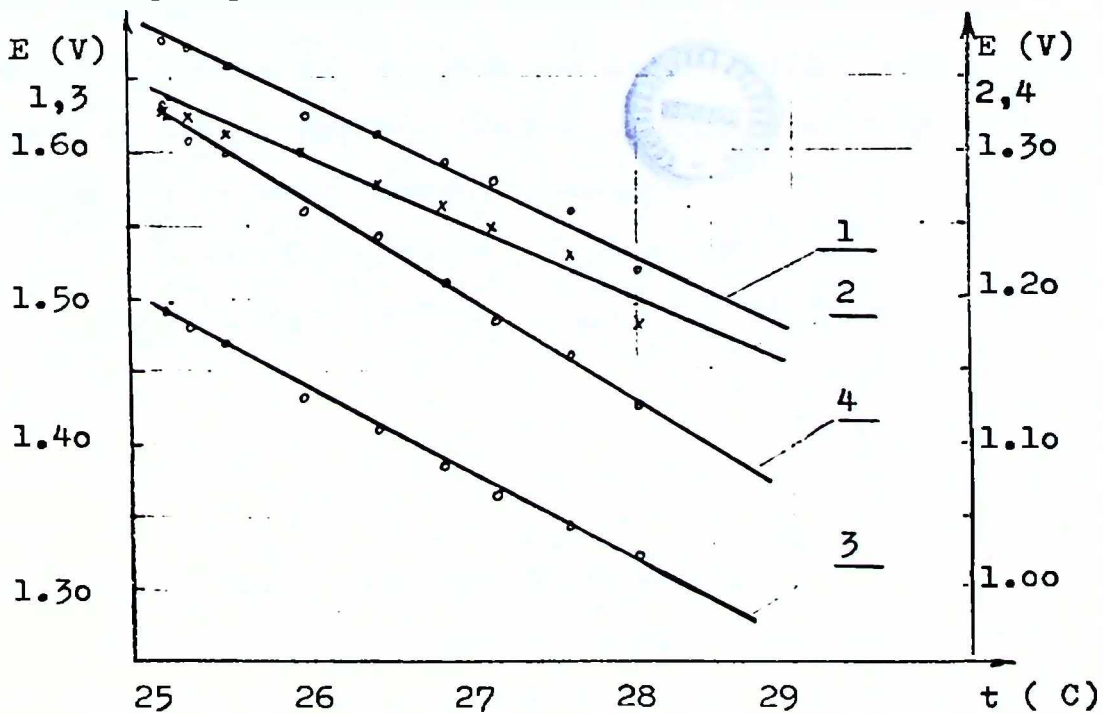
Detaljna mjerenja koja su izvršili Jorgenson [51] i Bruun i Tropea [43] su pokazala da je uticaj brzine  $v$  na efektivnu brzinu potrebno korigovati preko koeficijenta  $k_\varphi$  na sledeći način:

$$U_e = [(U \cos \alpha_e - w \sin \alpha_e)^2 + k_\varphi^2 v^2]^{0.5} \quad \dots(2.14)$$

Koeficijent  $k_\varphi$  je veći ili jednak jedinici u zavisnosti od aerodinamičkog blokiranja koje, s druge strane, zavisi od konstrukcijskih karakteristika sonde. Maksimalna vrijednost koju su dobili Bruun i Tropea, ispitujući razne vrste sonde, iznosi 1.07. Ispitivane su sonde sa jednim senzorom smještenim u ravni njegovih nosača. Na osnovu rezultata koje je dobila Compté-Bellot slijedi da se uticaj aerodinamičkog blokiranja može svesti na minimum ako se senzor postavi izvan ravni njegovih nosača, što odgovara koeficijentu  $k_\varphi \approx 1$ . Ovo se može postići savijanjem nosača na njihovim vrhovima. S druge strane treba očekivati povećanja koeficijenta  $k_\varphi$  kod multisenzorskih sonde u odnosu na sonde sa jednim senzorom s obzirom na povećan broj nosača na relativno malom prostoru. Kao što se može vidjeti sa sl.4 i sl.5, senzori upotrebljene sonde se ne nalaze u ravni nosača, pa treba očekivati relativno malu vrijednost koeficijenta  $k_\varphi$ .

### 2.2.2 Korekcija usled promjene sobne temperature

Kao što je navedeno u predhodnom odjeljku zakon hlađenja zavisi od temperature vazduha (fluida), pa ukoliko ista nije konstantna neophodno je izvršiti odgovarajuću korekciju. Temperaturu u laboratoriji nije bilo moguće održavati konstantnom jer, pri upotrebi erkondišna, skokove temperature od najmanje  $1^{\circ}\text{C}$  nije bilo moguće izbjeći. Ukoliko se erkondišn ne bi upotrebljavao došlo bi do zagrijavanja vazduha usled oslobađanja toplote motora koji je pokretao ventilator, kao i promjene spoljašnjih vremenskih uslova. Izvedeni eksperimenti su pokazali da je uticaj promjene temperature znatan i da se promjene od  $0.5^{\circ}\text{C}$  i više moraju uzeti u obzir. U cilju korekcije ovog uticaja analiziran je pad napona duž senzora pri konstantnoj brzini strujanja i promenljivoj temperaturi. Niz izvedenih mjerenja su pokazali da je ova zavisnost, za relativno male promjene temperature do  $3^{\circ}\text{C}$ , linearna u relativno velikom opsegu brzine. Medjutim, nagib linije promjene je, u opštem slučaju, različit za svaki senzor, pa je potrebno izvršiti korekciju za svaki od njih posebno.



Na sl.9 su prikazani samo djelimični rezultati mjerenja imajući u vidu da su svi ostali pokazali isti karakter promjene. Provlačenjem prave linije kroz skup dobijenih tačaka, a koristeći metodu najmanjeg kvadratnog odstupanja, slijedi da se može naći sledeća veza:

$$E = C_1 + C_2 t. \quad \dots(2.15)$$

Poseban eksperiment u cilju ove korekcije nije potrebno vršiti, već se isti može izvesti u toku kalibracije postavljanjem sonde u inde- tično strujno polje pri različitim temperaturama u toku procesa ka- libracije. Pri korekciji je neophodno odabrati referentnu tempera- turu npr.  $t_R$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), a onda se dobijeni napon  $E$  (V) pri različitim te- mperaturama  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) može korigovati na referentni  $E_R$  (V) koji bi se dobio pri stalnoj temperaturi na sledeći način:

$$E_R = C_1 + C_2 t_R. \quad \dots(2.16)$$

Na osnovu (2.15) i (2.16) slijedi:

$$E_R = E + C_2 (t_R - t). \quad \dots(2.17)$$

Prema tome, za korekciju je od bitnog značaja samo konstanta  $C_2$  koja u opštem slučaju, kao što se može vidjeti sa sl.9, ima ra- zličite vrijednosti za svaki senzor. Detaljni eksperimentalni podaci su dati u dodatku br.1, a na osnovu njih su određene ko- nstante  $C_{2i}$  za svaki senzor posebno:

$$\begin{aligned} C_{21} &= -0.0497 \text{ (V/}^{\circ}\text{C)}, & C_{22} &= -0.0472 \text{ (V/}^{\circ}\text{C)}, \\ C_{23} &= -0.0555 \text{ (V/}^{\circ}\text{C)}, & C_{24} &= -0.0654 \text{ (V/}^{\circ}\text{C)}. \end{aligned}$$

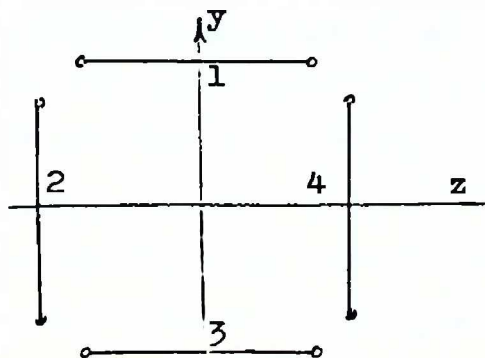
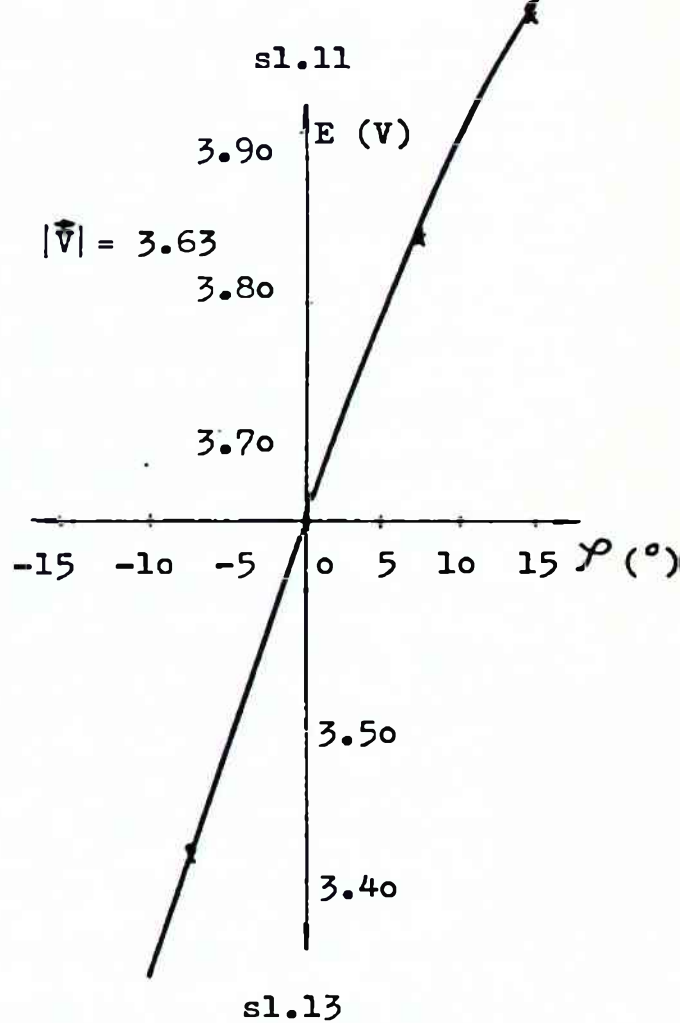
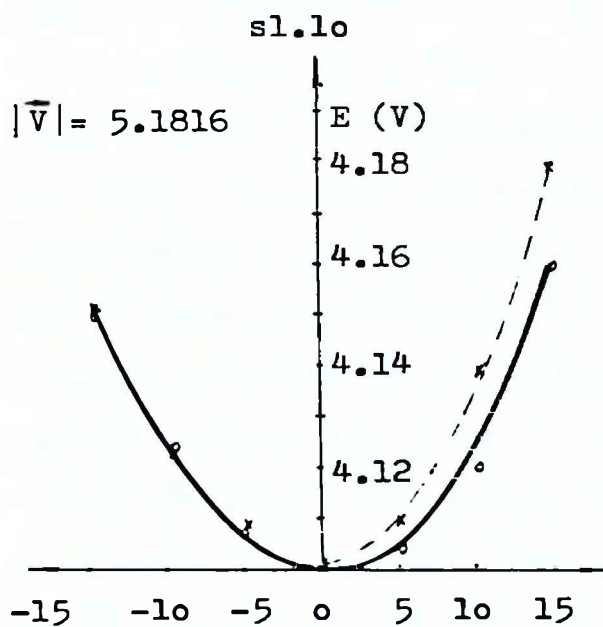
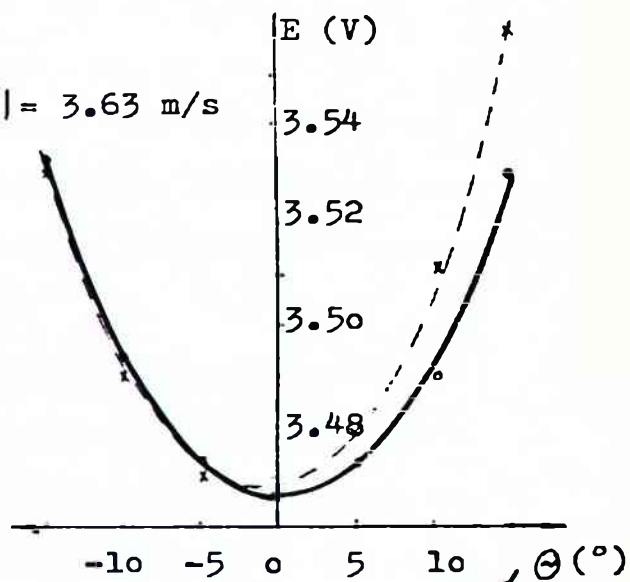
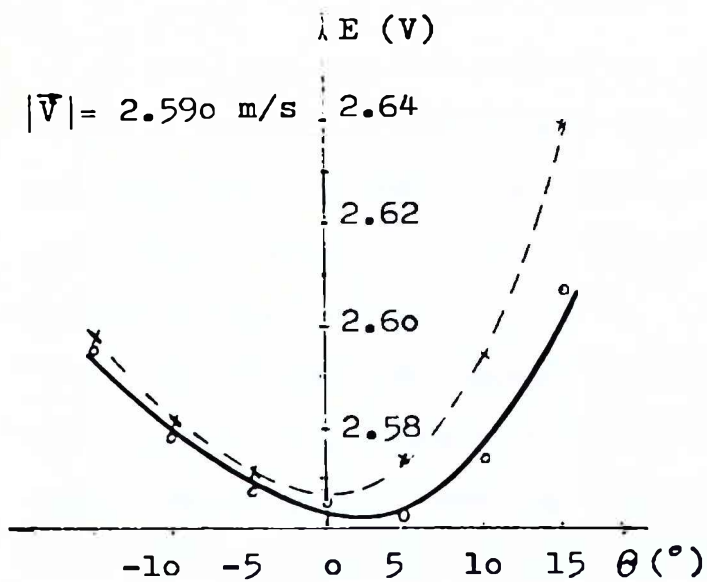
### 2.2.3 Ispitivanje termalne kontaminacije

Kod svih multisenzorskih sondi može doći do tzv. termalne kontaminacije tj. medjusobnog toplotnog uticaja senzora. Ova poja- va nije detaljno ispitana tako da opšti uslovi pod kojima se može

izbjeći nijesu poznati. Razlog za ovo leži u tome što je broj multisenzorskih sonde koje su danas u upotrebi relativno mali. Medjusobni uticaj senzora je u prvom redu funkcija njihovog rastojanja i brzine strujanja. Sa povećanjem dimenzija sonde i brzine strujanja opasnost od termalne kontaminacije se smanjuje. Sve sonde Kovasznay-tipa za mjerenje vrtloga, do danas upotrebljavane, bile su relativno velikih dimenzija sa rastojanjem medju sensorima od 3 - 4 mm. Za turbulentni granični sloj relativno male brzine (oko 3 m/s na spoljašnjoj granici graničnog sloja) rastojanje medju sensorima, prema kriterijumima Wingard-a, mora biti manje od jednog milimetra ukoliko se žele mjeriti najmanji vrtlozi. Sa porastom brzine dimenzije najmanjih vrtloga se smanjuju što uslovljava smanjivanje dimenzija sonde. Minimalne dimenzije sonde su ograničene konstrukcionim mogućnostima. Sonda kojom su izvedena mjerenja, iako po svom obliku mnogo složenija od Kovasznay-tipa sonde, je manja od nje i za sada ne postoje mogućnosti za izradu sonde manjih dimenzija istog tipa. S obzirom da su te dimenzije daleko manje od do sada postojećih Kovasznay-tipa sonde, postojala je mogućnost termalne kontaminacije pa je istu trebalo ispitati.

Može se u opštem slučaju pretpostaviti da je medjusobni toplotni uticaj senzora funkcija sve tri komponente brzine tj. brzine u glavnom pravcu strujanja i uglova nagiba sonde u horizontalnoj ravni  $\theta$  i vertikalnoj ravni  $\varphi$  pri kalibraciji, zatim medjusobnog rastojanja senzora i konačno stepena pregrijavanja tj. temperature senzora.

Ispitivanja su sprovedena mjerenjem pada napona duž senzora u funkciji brzine pri uključivanju samo tog senzora i upoređivanjem dobijenih rezultata sa padom napona pri istom brzinskom polju i uključenim ostalim sensorima. Rezultati dobijeni za senzor br.4 su prikazani na sl.10 - 13, dok je šema sonde prikazana na sl.14. Za ostale senzore su dobijeni analogni rezultati.



$\vec{V}$  - brzina u pravcu ose  $x'$  (vidi sl.

— pad napona pri uklj. svim senz.  
 --- pad napona pri uklj. senz. br.4

Zagrijavanje jednog senzora toplotnom energijom koja dolazi sa ostalih izaziva pad napona na njemu jer je dio električne energije, potreban za održavanje konstantne temperature senzora, kompezovan tom toplotnom energijom. Ukoliko se ovaj uticaj ne bi korigovao, izmjerene brzine bi bile manje od stvarnih (zbog smanjenih napona).

Na osnovu prikazanih rezultata se može zaključiti da termalna kontaminacija zavisi u prvom redu od inteziteta transvezalnih komponenata brzine. Tako npr. prisutna je razlika napona za senzor br.4 pri  $w > 0$  ( $w = |V| \sin \theta$ ) i raste sa porastom  $\theta$ . Ovo se može objasniti činjenicom da je senzor br.4, pri  $\theta > 0$ , u termalnom tragu senzora br.2, a djelimično i senzora br.1 i br.3. Pri istom uglu  $\theta$  nema praktično nikakvog uticaja na senzor br.2. Međutim, pri  $\theta < 0$  pojavljuje se analogan uticaj senzora br.4 na senzor br.2. Potpuno ista situacija je sa senzorima br.1 i br.3, s tim što je termalna kontaminacija senzora br.1 nešto izraženija u poređenju sa kontaminacijom senzora br.3. To se može objasniti tzv. "efektom dimnjaka" tj zagrijavanjem senzora br.1 usled kretanja toplog vazduha u pravcu ose y. Ova pojava naročito dolazi do izražaja pri malim brzinama strujanja. Pri većim brzinama strujanja uticaj termalne kontaminacije se smanjuje, što se vidi na osnovu prikazanih eksperimentalnih rezultata. To se može objasniti pojavom sužavanja termalnog traga i odnošenjem toplog vazduha niz struju, u pravcu glavnog strujanja, prije dodira sa ostalim senzorima. Sa sl.13 se vidi da komponenta brzine v ne izaziva termalnu kontaminaciju senzora br.4. Slična situacija je sa uticajem komponente brzine w na senzore br.1 i br.3, što je u skladu sa navedenim zaključkom o pojavi termalnog traga.

Eksperimenti su izvedeni pri stepenu pregrijavanja 1.42 i pokazuju da se za precizna mjerenja termalni uticaj mora izbjeći



ili korigovati. Moguće je eksperimentalnim putem doći do korekcione formule pri čemu bi korekcija zavisila od brzine. Ovakav postupak bi imao nekoliko nedostataka. Pored teškoća u traženju eksperimentalnog izraza za korekciju, pri rješavanju konkretnog problema bi trebalo primijeniti metod sukcesivnih aproksimacija. Prvo bi bilo neophodno naći brzinu na osnovu nekorigovanog napona, zatim izvršiti korekciju na osnovu poznate brzine, ponovo naći brzinu itd. Termalna kontaminacija bi se mogla izbjeći i povećanjem dimenzija sonde kao i povećanjem brzine strujanja. Medjutim, ukoliko se žele mjeriti najmanji vrtlozi onda se dimenzije sonde moraju smanjivati. To smanjenje bi trebalo biti utoliko veće ukoliko se povećava brzina, tako da se ovaj postupak ne može primijeniti. Preostala je još jedna mogućnost za otklanjanje termalne kontaminacije - to je smanjenje stepena pregrijavanja, čime se postiže smanjivanje radne temperature senzora. Smanjivanjem stepena pregrijavanja smanjuje se i osjetljivost senzora tako da i u ovom pogledu postoje ograničenja. Izvedeni su eksperimenti sa stepenom pregrijavanja 1.22 i dobijena znatna poboljšanja. Razlika napona (mjerena na drugom stepenu pojačanja sl.6), pri uključenom jednom i svim senzorima zajedno, nije prelazila vrijednost od 10 mV, što predstavlja maksimalnu tačnost koju je bilo moguće postići sa raspoloživim instrumentima. Imajući to u vidu eksperimenti su dalje nastavljeni sa stepenom pregrijavanja 1.22.

#### 2.2.4 Eksperimentalno odredjivanje konstanti $A_i$ i $n_i$

Na osnovu izraza (2.6) i (2.14) može se za horizontalne senzore napisati sledeća jednakost:

$$E^2 = A_i + B_i \left[ (U \cos \alpha_{ei} \pm w \sin \alpha_{ei})^2 + k_{pi}^2 v^2 \right]^{\frac{n_i}{2}} ; i = 1, 3 \quad (2.18a)$$

a za vertikalne,

$$E^2 = A_i + B_i \left[ (U \cos \alpha_{ei} + v \sin \alpha_{ei})^2 + k_{pi}^2 v^2 \right]^{\frac{n_i}{2}}; i = 2, 4 \quad (2.18b)$$

U cilju odredjivanja konstanti  $A_i$  i  $n_i$  potrebno je odabrati takvo strujno polje kod koga su  $v = w = 0$ , odnosno:

$$E^2 = A_i + B_i (U \cos \alpha_{ei})^{n_i}; i = 1, 2, 3, 4. \quad \dots (2.19)$$

Uvodeći u račun novu konstantu  $D_i = B_i (\cos \alpha_{ei})^{n_i}$  gornji izraz se svodi na sledeći oblik:

$$E^2 = A_i + D_i U^{n_i}; i = 1, 2, 3, 4. \quad \dots (2.20)$$

Prema Kingu, kao što je navedeno u odjeljku 2.2.1, eksponent  $n_i$  ima univerzalan karakter i iznosi  $n_i = 0.5$ , dok je niz autora došlo do zaključka da manje vrijednosti, do  $n_i = 0.44$ , bolje odgovaraju. Bruun i Tropea [43] su zaključili da je  $n_i$  funkcija brzine strujanja i da njegova vrijednost opada sa smanjenjem brzine. Tako npr. dobili su optimalnu vrijednost  $n = 0.38$  za opseg brzina 2 - 10 m/s.

U cilju optimizacije  $A_i$  i  $n_i$  prvo su, za odgovarajući skup eksperimentalnih podataka  $E = f(U)$  i usvojenu vrijednost  $n_i$ , nađene konstante  $A_i$  i  $D_i$  provlačenjem krive linije kroz dobijeni skup tačaka koristeći metodu najmanjeg kvadratnog odstupanja. Zatim je postupak ponovljen varirajući vrijednost eksponenta  $n_i$  u granicama  $0.32 \leq n_i \leq 0.5$  i analizirana greška definisana sledećim izrazom:

$$\xi_v = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{U}{U_s}\right)^2}, \text{ gdje su:} \quad \dots (2.21)$$

$\xi_v$  - standardna devijacija usled razlike teorijskog i eksperimentalnog zakona promjene  $E = f(U)$ ,

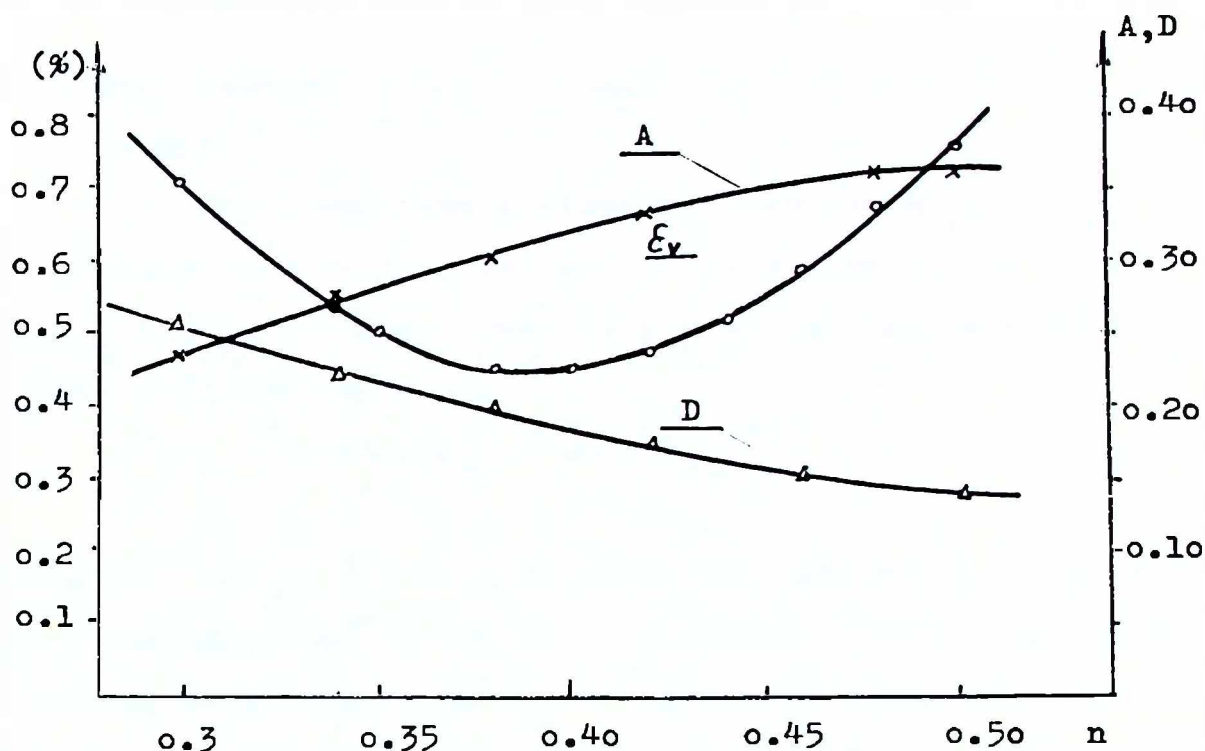
$N$  - broj mjernih tačaka,

$U$  - brzina strujanja dobijena na osnovu eksperimentalnog zakona hladjenja (2.20),

$U_s$  - stvarna brzina hladjenja.



Optimalnoj vrijednosti  $n_i$  odgovara minimum krive  $\xi_v = f(n_i)$ . Ukoliko je nagib ove krive u okolini minimuma mali, onda su sve vrijednosti za  $n_i$  u toj oblasti praktično podjednako dobre. U suprotnom slučaju je neophodno odabrati optimalnu vrijednost za  $n_i$ . Na sl.15 su prikazane funkcije  $\xi_v(n_i)$ ,  $A_i(n_i)$  i  $D_i(n_i)$  za jedan vertikalni senzor (senz. br.4).



sl.15

Slične funkcije su dobijene i za ostala tri senzora, a na osnovu njih konstante  $A_i$ ,  $B_i$  i  $n_i$  koje odgovaraju minimumu krive  $\xi_v(n_i)$ :

senz. br.	1	2	3	4
$A_i$	0.5106	0.2908	0.4045	0.3179
$D_i$	0.2767	0.1770	0.2491	0.1815
$n_i$	0.40	0.36	0.38	0.40

tab.1

Kao što se može vidjeti iz gornje tabele, eksponenti  $n_i$  su znatno

manji od 0.5 što je u skladu sa rezultatima drugih istraživača, naročito sa najnovijim rezultatima koje su dobili Bruun i Tropea [43]. Detaljni eksperimentalni podaci potrebni za određivanje  $A_i$ ,  $D_i$  i  $n_i$  su dati u dodatku br.1.

#### 2.2.5 Eksperimentalno određivanje efektivnih uglova $\alpha_{ei}$ i konstanti $B_i$

U cilju određivanja efektivnih uglova  $\alpha_{e1}$  i  $\alpha_{e3}$  potrebno je sondu postaviti u strujno polje u kome je  $v = 0$ , a za uglove  $\alpha_{e2}$  i  $\alpha_{e4}$  u polje u kome je  $w = 0$ . Imajući to u vidu izrazi (2.18a) i (2.18b) postaju:

$$E^2 = A_i + B_i (U \cos \alpha_{ei} \pm w \sin \alpha_{ei})^{n_i}; i = 1, 3, \dots (2.22a)$$

$$E^2 = A_i + B_i (U \cos \alpha_{ei} \mp v \sin \alpha_{ei})^{n_i}; i = 2, 4. \dots (2.22b)$$

Varirajući brzine  $U$  i  $w$  za horizontalne odnosno  $U$  i  $v$  za vertikalne senzore, mogu se odrediti efektivni uglovi i konstante  $B_i$ , s obzirom da su konstante  $A_i$  već određene (predhodni odjeljak). Promjenom ugla nagiba  $\theta$  u horizontalnoj ravni i  $\varphi$  u vertikalnoj ravni u jednolikoj struji brzine  $|\vec{V}| = 2.5900 \text{ m/s}$ , varirane su komponente brzine  $U, v$  i  $w$ . Detaljni eksperimentalni rezultati su priloženi u odjeljku br.1, a na osnovu njih i izraza (2.22a) i (2.22b) određene su sledeće vrijednosti efektivnih uglova i konstanti  $B_i$  i  $D_i$ :

senz. br.	1	2	3	4
$\alpha_{ei}$	37.660	38.520	37.970	38.540
$B_i$	0.3068	0.1955	0.2733	0.2009
$D_i$	0.2794	0.1790	0.2497	0.1820

tab.2

Konstanta  $D_i$ , data u tab.2, je sračunata na osnovu efektivnih uglova  $\alpha_{ei}$  i konstanti  $B_i$ . Iako je ovaj eksperiment nezavisan (drugačijeg tipa) od eksperimenta izvedenog u odjeljku 2.2.4 u cilju odredjivanja optimalne vrijednosti za  $n_i$ , dobijene vrijednosti konstante  $D_i$  u oba slučaja se veoma dobro slažu.

Ukoliko bi se u zakonu hladjenja (2.18a) i (2.18b) umjesto efektivnog usvojio stvarni ugao  $\alpha_i$  onda bi konstante  $D_{si}$ , koje odgovaraju ovom uglu, bile definisane na sledeći način:

$$D_{si} = B_{si} (\cos \alpha_i)^{n_i}; i = 1, 2, 3, 4, \dots (2.23)$$

a eksperimentalnim putem dobijene vrijednosti indetične onim datim u tab.1, s obzirom da se oblik izraza (2.20) ne bi mijenjao. Imajući u vidu da su ove vrijednosti istovjetne sa onim za  $D_i$  dobijenim preko efektivnih uglova datim u tab.2, slijedi da je:

$$B_{si} (\cos \alpha_i)^{n_i} = B_i (\cos \alpha_{ei})^{n_i}.$$

Svi eksperimenti izvedeni u cilju kalibrisanja ove sonde su potvrdili gornji izraz. Korišćenjem ovog izraza zakon hladjenja (2.18a) i (2.18b) se može transformisati na sledeći oblik:

$$E^2 = A_i + B_{si} [(U \cos \alpha_i \pm k_{\theta i} w \sin \alpha_i)^2 + k_{\rho i}^2 v^2]^{n_i/2}; i = 1, 3, \dots (2.24a)$$

$$E^2 = A_i + B_{si} [(U \cos \alpha_i \mp k_{\theta i} v \sin \alpha_i)^2 + k_{\rho i}^2 w^2]^{n_i/2}; i = 2, 4, \dots (2.24b)$$

gdje je:

$$k_{\theta i} = \frac{\sin \alpha_{ei}}{\sin \alpha_i} \left( \frac{B_i}{B_{si}} \right)^{1/n_i}.$$

Kao što je navedeno u odjeljku 2.2.1, pojam efektivnog ugla je uveden kao posledica eksperimentalnih opažanja nekih istraživača. Pokazalo se da zamjena stvarnog ugla nekim fiktivnim (efektivnim) daje relativno dobre rezultate. Medjutim, ova pojava do sada nije eksplicitno objašnjena. To je, uz sumnju da ne daje dobre rezultate za širok domen promjene transvezalnih komponenata brzine, bio razlog za relativno rijetku primjenu ove ideje i pored pogodnosti koje pruža u računskom pogledu.

Na osnovu upravo sprovedene analize može se objasniti uloga efektivnog ugla i njegovo fizičko značenje. Izrazi (2.18a) i (2.24a) odnosno (2.18b) i (2.24b) su indetični, jer slijede jedni iz drugih upotrebom veze (2.23). Prema tome, efektivni ugao u izrazima (2.18a,b) je adekvatan stvarnom uglu i koeficijentu blokiranja  $k_{\theta_i}$  u izrazima (2.24a,b) i obratno. Svejedno je da li će se primijeniti izrazi (2.24a,b) uz upotrebu stvarnog poznatog ugla, pri čemu je eksperimentalnim putem potrebno odrediti koeficijent blokiranja  $k_{\theta_i}$  ili izrazi (2.18a,b) uz eksperimentalno određivanje efektivnog ugla nagiba  $\alpha_{ei}$ . Razlika efektivnog i stvarnog ugla se, prema tome, pojavljuje kao posledica aerodinamičkog blokiranja. Mada su izrazi (2.24a,b) jasniji u fizičkom pogledu, jer aerodinamičko blokiranje obije transvezalne komponente treba očekivati usled uticaja nosača senzora i njegove konačne dužine, izrazi (2.18a,b) su jednostavniji pa su zato pogodniji za praktičnu primjenu. Pored toga, njihovom primjenom se isključuje potreba za posebnim uređajem za tačno mjerenje uglova nagiba senzora.

Ukoliko bi koeficijenti blokiranja bili jednaki jedinici, tj. uticaj blokiranja zanemarljiv, izrazi (2.24a,b) bi se sveli na poznati kosinusni zakon. Ovaj zakon daje dobre rezultate za relativno duge senzore. Očigledno je da u tom slučaju uticaj nosača na blokiranje strujanja (deformaciju strujne slike na centralnom dijelu senzora) je zanemarljiv, pa bi se izrazi (2.24a,b) sveli na kosinusni zakon što potvrđuje njihovu tačnost.

### 2.2.6 Eksperimentalno odredjivanje koeficijenata blokiranja $k_{\varphi i}$

Koeficijenti blokiranja  $k_{\varphi 1}$  i  $k_{\varphi 3}$  (izraz (2.18a)) se mogu odrediti variranjem komponenata brzine  $U$  i  $v$  pri  $w = 0$ , a koeficijenti  $k_{\varphi 2}$  i  $k_{\varphi 4}$  (izraz (2.18b)) variranjem komponenata brzine  $U$  i  $w$  pri  $v = 0$ . Prvi slučaj odgovara promjeni ugla  $\varphi$  pri kalibraciji, a drugi promjeni ugla  $\Theta$ , s obzirom da je  $v = |\vec{V}| \sin \varphi$  a  $w = |\vec{V}| \sin \Theta$ . Na osnovu eksperimentalnih podataka priloženih u dodatku br.1 sračunati su koeficijenti blokiranja i dati u tab.3.

senz. br.	1	2	3	4
$k_{\varphi i}$	1.023	1.017	0.970	1.032

tab.3

Eksperimentalni podaci pri malim transvezalnim komponentama brzine nijesu korišćeni, jer izraz za koeficijent blokiranja u tom slučaju postaje neodredjen.

S obzirom da su koeficijenti blokiranja približno jednaki jedinici njihov uticaj se može zanemariti, tim prije što odgovarajuća transvezalna komponenta brzine ne učestvuje sa više od 25% u ukupnoj efektivnoj brzini hladjenja. Prema tome, može se zaključiti da se savijanje vrhova senzora, izvedeno na upotrebljenoj sondi, pokazalo efikasnim.

### 3. MJERENJE BRZINE I KOMPONENTE VRTLOGA U GLAVNOM PRAVCU STRUJANJA

Razvijajući brzinu u Tejlorov red oko centra sonde i zanemarujući članove drugog i višeg reda dobijaju se, s obzirom da su koeficijenti blokiranja  $k_{pi} \approx 1$ , sledeći izrazi za efektivne brzine hladjenja:

$$U_{e1}^2 = \left[ \left( U_0 + \frac{\partial U}{\partial y} \frac{h}{2} \right) \cos \alpha_{e1} + \left( W_0 + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{h}{2} \right) \sin \alpha_{e1} \right]^2 + \left( V_0 + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{h}{2} \right)^2 \dots (3.1)$$

$$U_{e2}^2 = \left[ \left( U_0 - \frac{\partial U}{\partial z} \frac{h}{2} \right) \cos \alpha_{e2} - \left( V_0 - \frac{\partial V}{\partial z} \frac{h}{2} \right) \sin \alpha_{e2} \right]^2 + \left( W_0 - \frac{\partial W}{\partial z} \frac{h}{2} \right)^2 \dots (3.2)$$

$$U_{e3}^2 = \left[ \left( U_0 - \frac{\partial U}{\partial y} \frac{h}{2} \right) \cos \alpha_{e3} - \left( W_0 - \frac{\partial W}{\partial y} \frac{h}{2} \right) \sin \alpha_{e3} \right]^2 + \left( V_0 - \frac{\partial V}{\partial y} \frac{h}{2} \right)^2 \dots (3.3)$$

$$U_{e4}^2 = \left[ \left( U_0 + \frac{\partial U}{\partial z} \frac{h}{2} \right) \cos \alpha_{e4} + \left( V_0 + \frac{\partial V}{\partial z} \frac{h}{2} \right) \sin \alpha_{e4} \right]^2 + \left( W_0 + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{h}{2} \right)^2 \dots (3.4)$$

Ove relacije definišu efektivne brzine hladjenja za svaki senzor u funkciji sve tri komponente brzine u centru sonde, njihovih gradijenata u ravni normalnoj na osu sonde, efektivnih uglova nagiba senzora  $\alpha_{ei}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  i visine  $h$  prikazane na sl.4. Ovo su tačni izrazi za efektivne brzine hladjenja svakog senzora uključujući (zadnji član u svakom izrazu) efekat transvezalne komponente brzine normalne na ravan u kojoj leži senzor, efekat koji je uglavnom zanemaren pri analizi X - sonde što se može vidjeti na osnovu analize sprovedene u radovima [30], i [31]. Ako se ovi zadnji članovi prebace na lijevu stranu jednačina one mogu biti kombinovane (sabirajući jednačine (3.1) i (3.3) a zatim (3.2) i (3.4) i oduzimajući dobijene sume) u cilju dobijanja izraza za longitudinalnu komponentu vrtloga:



$$\omega_x = \frac{1}{2h \sin \alpha_e} \left[ \sqrt{U_{e3}^2 - v_0^2 + v_0 h \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h^2}{4} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2} + \sqrt{U_{e1}^2 - v_0^2 - v_0 h \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h^2}{4} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2} \right. \\ \left. - \sqrt{U_{e4}^2 - w_0^2 - w_0 h \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{h^2}{4} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2} - \sqrt{U_{e2}^2 - w_0^2 + w_0 h \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{h^2}{4} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2} \right] \quad \dots(3.5)$$

Ugao  $\alpha_e$  je uzet kao srednja aritmetička vrijednost svih uglova koji su približno iste veličine;  $\alpha_e = 38.17^\circ$ . Ovaj izraz sadrži četiri efektivne brzine hladjenja, koje se mogu dobiti poslije sprovedene kalibracije (izraz (2.6)), zatim trenutne komponente brzine u centru sonde i dvije grupe dodatnih članova koji sadrže gradijente brzine. Izraz (3.5) se može razviti, poslije transformacije korenova na oblik  $(1+x)^n$ , koristeći binomnu teoremu. Analiza veličine pojedinih članova pokazuje da samo prva dva člana ispod svakog korijena igraju znatnu ulogu, dok su ostali zanemarljivi. Imajući to u vidu ovaj izraz se redukuje na sledeću jednačinu za longitudinalnu komponentu vrtloga:

$$\omega_x = \frac{1}{2h \sin \alpha_e} \left[ \sqrt{U_{e3}^2 - v_0^2} + \sqrt{U_{e1}^2 - v_0^2} - \sqrt{U_{e4}^2 - w_0^2} - \sqrt{U_{e2}^2 - w_0^2} \right]; \quad \dots(3.6)$$

koja sadrži samo efektivne brzine hladjenja i transvezalne komponente brzine  $v_0$  i  $w_0$ . Na sličan način mogu biti dobijene jednačine za transvezalne komponente brzine oduzimanjem izraza (3.4) od (3.2) i (3.3) od (3.1):

$$v_0 = \frac{1}{2 \sin \alpha_e} \left[ \sqrt{U_{e4}^2 - w_0^2} - \sqrt{U_{e2}^2 - w_0^2} - h \frac{\partial U}{\partial z} \cos \alpha_e \right] \quad \dots(3.7)$$

$$w_0 = \frac{1}{2 \sin \alpha_e} \left[ \sqrt{U_{e1}^2 - v_0^2} - \sqrt{U_{e3}^2 - v_0^2} - h \frac{\partial U}{\partial y} \cos \alpha_e \right] \quad \dots(3.8)$$

Očigledno je da se u ovim izrazima nalaze, pored efektivnih brzina hladjenja, kvadrati  $v_0$  i  $w_0$  kao i gradijenti longitudinalna kompo-

nente brzine u ravni normalnoj na osu sonde. Ako se ovi dodatni članovi zanemare, kao što je uobičajeno kod X - sonde, u jednačinama (3.7) i (3.8) će preostati transvezalne komponente brzine i efektivne brzine hladjenja. Pokazalo se da se ove jednačine mogu riješiti odgovarajućim postupkom sukcesivnih aproksimacija koji je veoma konvergentan. Međutim, zanemarivanje gradijenata longitudinalne komponente brzine iako prisutno kod svih X - sonde (a ova sonda, kao što je navedeno, predstavlja kombinaciju od dvije X - sonde) zaslužuje posebnu analizu koja je izvršena u sledećoj glavi.

Sabirajući jednačine (3.1) i (3.3), a zatim (3.2) i (3.4), mogu se dobiti dva nezavisna izraza za longitudinalnu komponentu brzine u sledećem obliku:

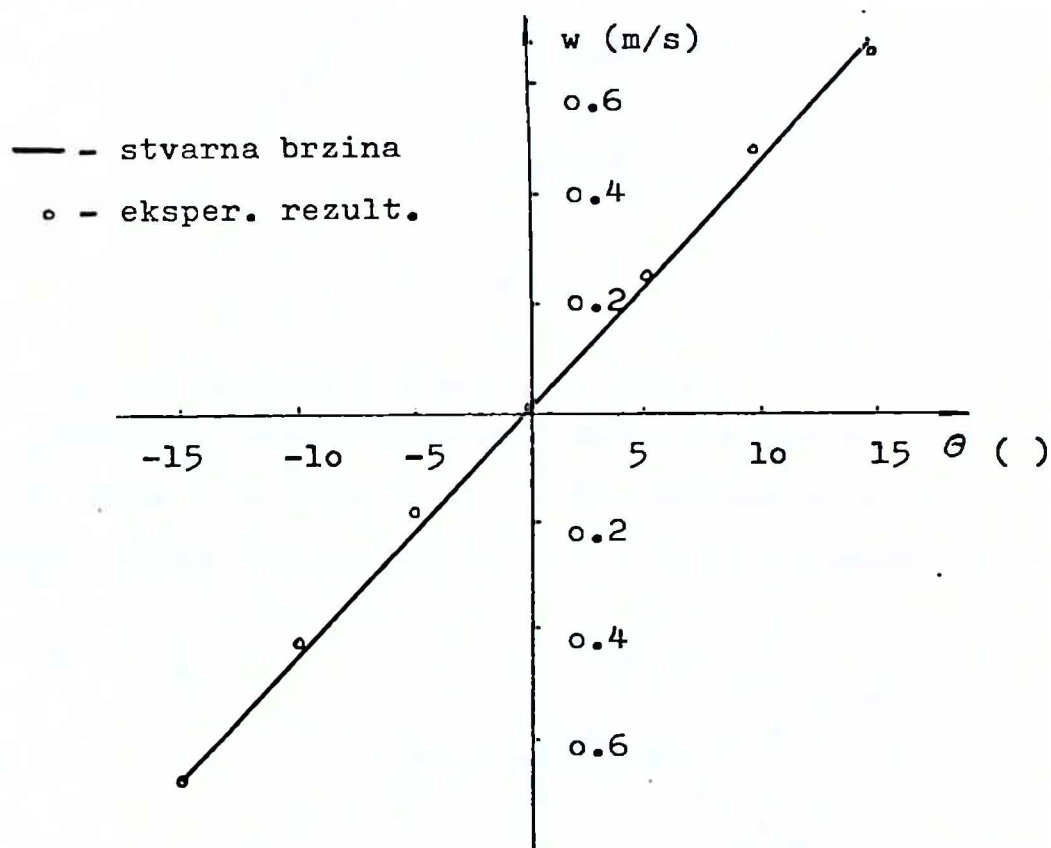
$$U = \frac{1}{2 \cos \alpha_e} \left[ \sqrt{U_{e1}^2 - v_0^2} + \sqrt{U_{e3}^2 - v_0^2} \right] \quad \dots(3.9)$$

$$U = \frac{1}{2 \cos \alpha_e} \left[ \sqrt{U_{e2}^2 - w_0^2} + \sqrt{U_{e4}^2 - w_0^2} \right] . \quad \dots(3.10)$$

U cilju ispitivanja mjernih karakteristika, sonda je postavljena u jednoliku struju sa promenljivim komponentama brzine, izvršeno mjerenje pada napona na sva četiri senzora, a zatim korišćenjem izraza (2.6) i (3.6) - (3.10) sračunate sve tri komponente brzine i komponenta vrtloga  $\omega_x$  u glavnom pravcu strujanja. Intezitet brzine u pravcu ose  $x'$  je bio  $|\vec{V}| = 2.5908 \text{ m/s}$ , dok je variranje komponentata brzine  $U$ ,  $v$  i  $w$  izvedeno promjenom uglova  $\theta$  i  $\varphi$ . Svaki senzor je bio uključen u nezavisno električno kolo. Frekventni odziv senzora i kola na datoj brzini je bio 2600 Hz tj. iznad maksimalne frekvence koja se može očekivati u turbulentnom strujanju za koje je sonda predviđena. Signali su pojačavani sa pojačivačima sa promenljivim dodatnim naponom (offset-om), a pojačanje i offset eksperimentalno određeni. Mjerenje signala je izvršeno poslije drugog

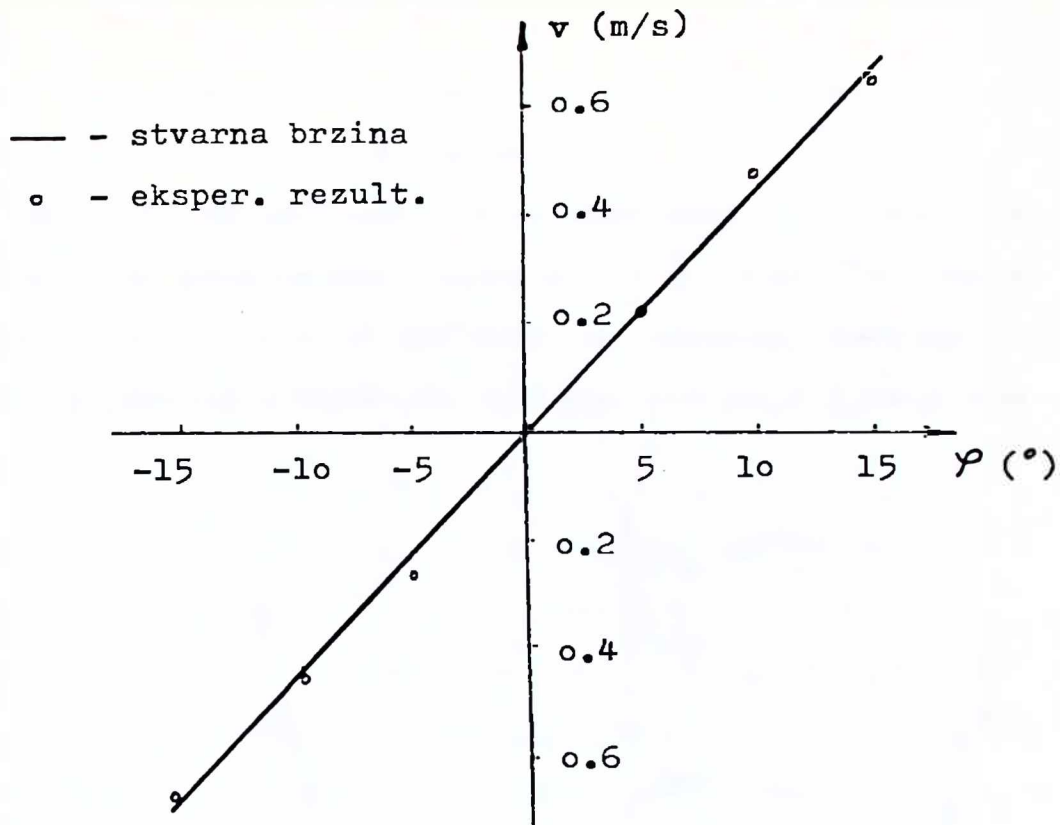


stepena pojačanja, a zatim su isti preračunati na vrijednoszi koje odgovaraju vrhu mosta (sl.6), jer one figurišu u zakonu hladjenja. Promjena uglova  $\Theta$  i  $\varphi$  je izvedena u granicama  $\pm 15$  što, prema rezultatima Kreplina i Eckelmann-a [33], odgovara maksimalnim veličinama transvezalnih komponenata brzine koje se mogu očekivati u turbulentnom strujanju. Izmjerene vrijednosti brzina i vrtloga su upoređene sa poznatim (indukovanim) i dobijeni rezultati prikazani na sl.16, sl.17, sl.18 i sl.19, dok su detaljni eksperimentalni rezultati dati u dodatku br.1.



sl.16

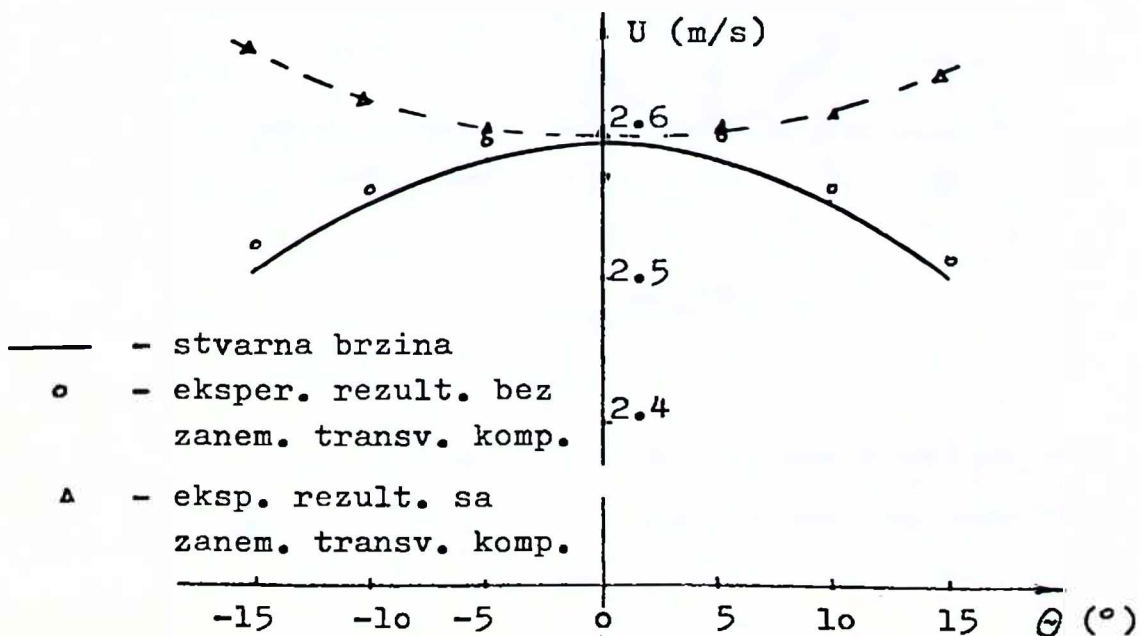
Sa sl.16 i sl.17 se vidi da je slaganje eksperimentalnih i indukovanih vrijednosti za transvezalne komponente brzine veoma dobro. Može se lako pokazati da zanemarivanje kvadrata transvezalnih brzina u izrazima (3.7) i (3.8), što u mnogome pojednostavljuje račun, nema praktično nikakvog uticaja na tačnost. Vrijednosti dobijene na ovaj način se praktično poklapaju sa prikazanim eksperimentalnim rezulta-



sl.17

tima, pa s toga nijesu posebno naznačene.

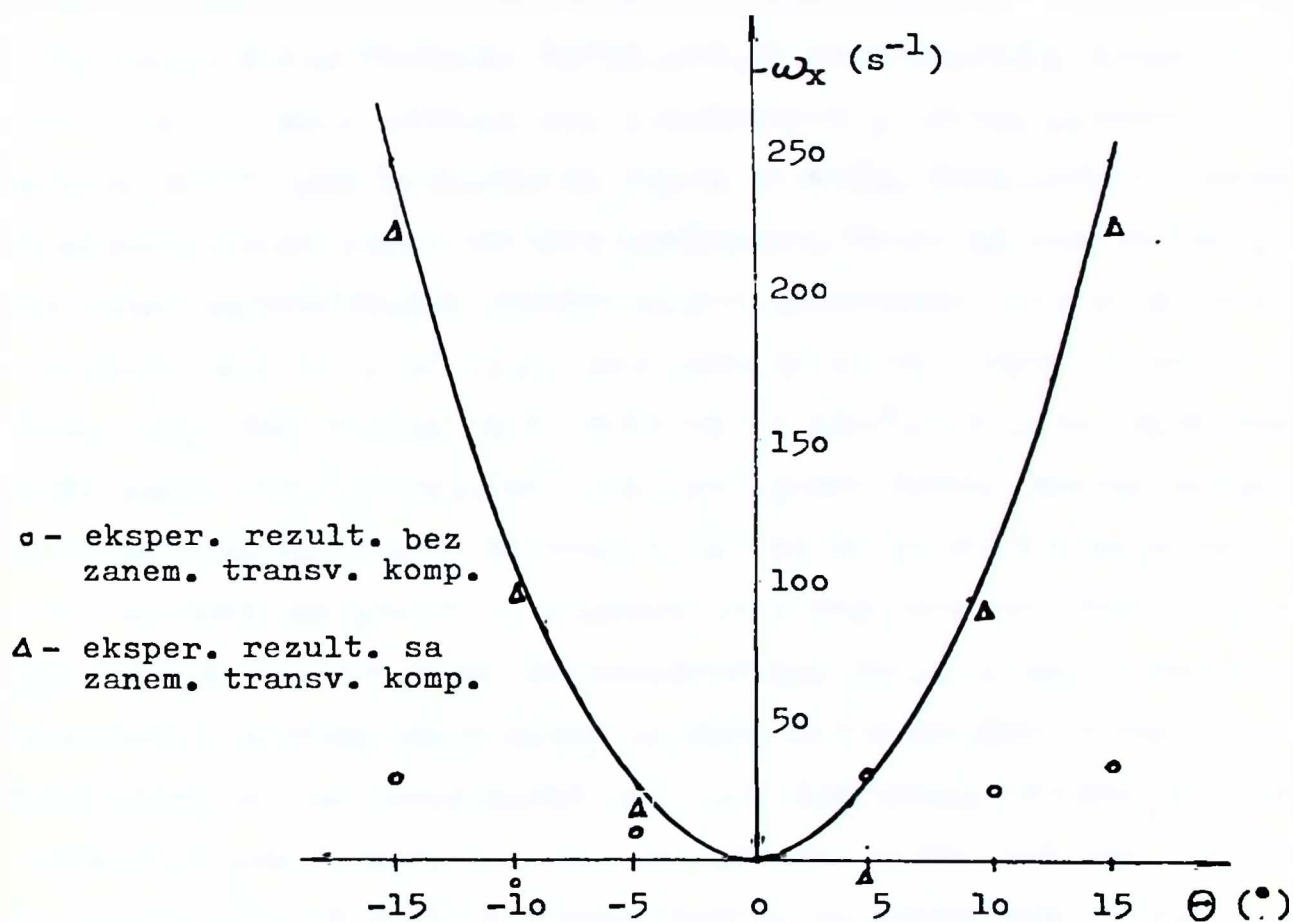
Izmjerena longitudinalna komponenta brzine  $U$  je upoređjena sa indukovanom i prikazana na sl.18. Ukoliko se uticaj transvezalnih komponentata u izrazima (3.9) i (3.10) zanemari izmjerene vri-



sl.18

jednosti imaju maksimalnu grešku od 5%. Uzimanjem ovih komponenata u obzir greška se redukuje na 1%.

Na sl.19 su prikazani rezultati dobijeni pri mjerenju vrtloga uz promenljive komponente brzine  $w$  i  $U$  ( $v = 0$ ). Variranjem komponenta brzine  $v$  i  $U$  ( $w = 0$ ) dobijeni su analogni rezultati dati u dodatku br.1. Stvarna vrijednost vrtloga pri ovim mjerenjima je bila



sl.19

jednaka nuli. Puna linija prikazuje sračunate vrijednosti vrtloga dobijene pomoću jednačine (3.6), zanemarivanjem transvezalnih komponenata brzine i korišćenjem vrijednosti efektivnih brzina hladjenja

odredjene računskim putem na osnovu poznatog strujnog polja. Imajući u vidu da je stvarni vrtlog jednak nuli, zanemarivanje transvezalnih komponenata rezultira u pojavi lažnog vrtloga tj. greške čija maksimalna apsolutna vrijednost iznosi  $250 \text{ s}^{-1}$ . Ukoliko se umjesto računskih uzmu eksperimentalne vrijednosti efektivnih brzina hladjenja dobijaju se rezultati koji su bliski računskim, što potvrđuje dobre mjerne karakteristike sonde. "a ovaj način je eksperimentalnim i računskim putem prikazan tačan uticaj transvezalnih komponenata brzine na mjerenje vrtloga kao i posledice njihovog zanemarivanja. Time su potvrđena opažanja do kojih su došli Kastrinakis i drugi. Na osnovu izraza (3.6) se može zaključiti da će se maksimalna greška usled zanemarivanja transvezalnih komponenata brzine pojaviti u slučaju ako jedna od njih ima maksimalnu vrijednost a druga je jednaka nuli. Taj slučaj je i prikazan na sl.19. Ukoliko obje komponente imaju istu vrijednost onda, na osnovu istog izraza, slijedi da je njihov zbirni uticaj minimalan tj. da se praktično može zanemariti. Ovim se može objasniti zaključak do kojeg je došao Kastrinakis [24], analizirajući sondu Kovasznay-tipa, da je uticaj transvezalnih komponenata brzine zanemarljiv za specijalan položaj sonde. Nije teško uočiti da tom specijalnom položaju odgovaraju vrijednosti transvezalnih komponenata brzine koje su medjusobno jednake. Kastrinakis je do ovog zaključka došao eksperimentalnim putem postavljajući sondu u različita indukovana strujna polja. Medjutim, u turbulentnom strujanju veličine transvezalnih komponenata brzine su uglavnom različite i nepredvidljive tako da se moraju uzeti u obzir.

Za razliku od Kovasznay-tipa sonde ovom sondom se, u principu, mogu mjeriti transvezalne komponente brzine (pod opšte prihvaćenom pretpostavkom o zanemarivanju gradijenata longitudinalne komponente brzine) i na taj način njihov uticaj uzeti u obzir. Ako se ovako izmjerene vrijednosti uvrste u izraz (3.6), dobijeni eksperimentalni

rezultati, prikazani na sl.19, se dobro slažu sa teorijskim s obzirom da se greška od oko  $50 \text{ s}^{-1}$  pojavljuje kao posledica šuma na instrumentima i nemogućnosti očitavanja napona sa tačnošću većom od  $\pm 0.5 \text{ mV}$ .

Pored uzimanja u obzir transvezalnih komponenata brzine, ova sonda ima još dvije prednosti u odnosu na sondu Kovasznay-tipa. One se mogu uočiti ako se u izrazu (3.6) zanemare transvezalne komponente brzine i prepostavi potpuno indetična linearna veza između efektivne brzine i pada napona duž sva četiri senzora. U tom slučaju se izraz (3.6) svodi na linearnu vezu koju je predložio Kovasznay. Predpostavka o linearnoj vezi između brzine i pada napona nije tačna ali se greška koja se pojavljuje kao posledica te prepostavke može korigovati na način koji je predložio Kastrinakis. Predpostavka o indetičnom zakonu hladjenja za sva četiri senzora je teško održiva, jer je sondu gotovo nemoguće izraditi potpuno simetrično u električnom pogledu.

Konstruksione karakteristike primijenjene sonde, koje omogućuju uključivanje svakog senzora u posebno električno kolo, dozvoljavaju upotrebu najpogodnijeg zakona hladjenja, isključuju uticaj asimetričnosti u električnom pogledu i omogućuju uzimanje u obzir transvezalnih komponenata brzine.

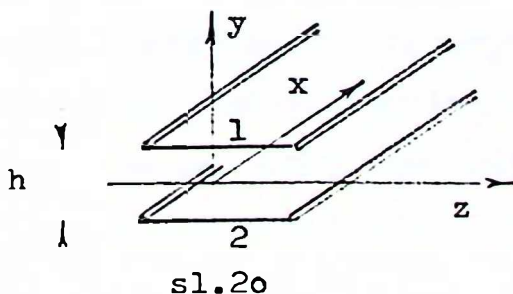
Konačno se može zaključiti da se longitudinalna komponenta vrtloga može mjeriti, upotrebom ove sonde, sa dovoljnom tačnošću u slučaju kada transvezalne komponente brzine mogu biti mjerene sa  $X$  - sondama tj. kada se gradijenti  $\partial U / \partial y$  i  $\partial U / \partial z$ , koji se pojavljuju u jednačinama (3.7) i (3.8), mogu zanemariti.

Kompletan proračun brzina i vrtloga je izvršen na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata i sa eksponentom  $n=0.5$  tj. bez optimizacije ovog eksponenta. Dobijeni su rezultati, dati u dodatku br.1, koji su gotovo indetični sa predhodnim. Medjutim, u tom slučaju treba očekivati nešto veću grešku sa promjenom inteziteta brzine  $|V|$  tj. sa promjenom položaja sonde u odnosu na zid pri mjerenju u gran. sloju.

#### 4. ANALIZA UTICAJA GRADIJENATA BRZINE

Izrazi (3.7) i (3.8) za određivanje transvezalnih komponenta brzine su potpuno identični sa odgovarajućim izrazima koji se koriste pri upotrebi X - sonde. Postoji niz radova u kojima su prezentirani rezultati mjerenja X - sondama i u svima njima je uticaj gradijenata longitudinalne komponente brzine u ravni normalnoj na osi sonde zanemarivan, jer je samo pod takvom pretpostavkom moguće obaviti mjerenje. Imajući u vidu rezultate do kojih su došli Willmarth i Bogar [36], koji tvrde da se gradijenti mogu zanemariti samo ako je rastojanje između senzora manje od  $1/20$  Kolmogorove razmjere, odlučeno je da se njihov uticaj detaljno ispita. Kao što je ranije navedeno, rastojanje između senzora za upotrebljenu sondu iznosi  $1/2$  Kolmogorove razmjere i za sada ne postoji mogućnost za izgradnju sonde manjih dimenzija. Čak i ako bi postojala takva mogućnost porasla bi opasnost od termalne kontaminacije senzora. Iako su rezultati do kojih su došli Willmarth i Bogar još uvijek predmet diskusije, činjenica da je minimalno rastojanje između senzora koje oni predlažu, pri kome je uticaj gradijenata zanemarljiv, mnogo manje od rastojanja kod upotrebene sonde zaslužuje posebnu pažnju.

Brodkey i Wallace [37], a nedavno i Sharma [38], su zaključili da su maksimalne vrijednosti gradijenata longitudinalne komponente brzine približno jednake gradijentu srednje brzine na zidu. U cilju mjerenja ovih gradijenata izradjena je sonda sa dva paralelna senzora, koji leže u ravni normalnoj na osi sonde na rastojanju  $0.7 \text{ mm}$  koje je identično rastojanju između senzora kod sonde za mjerenje vrtloga.





Efektivne brzine hladjenja za oba senzora su odredjene sledećim izrazima:

$$U_{e1}^2 = (U_o + \frac{\partial U}{\partial y} \frac{h}{2})^2 + (v_o + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{h}{2})^2, \quad \dots(4.1)$$

$$U_{e2}^2 = (U_o - \frac{\partial U}{\partial y} \frac{h}{2})^2 + (v_o - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{h}{2})^2. \quad \dots(4.2)$$

Prebacivanjem poslednjih članova sa desne na levu stranu i oduzimanjem dobijenih jednačina slijedi:

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{1}{h} \left\{ \sqrt{U_{e1}^2 - \left[ v_o^2 - h \frac{\partial v}{\partial y} v_o + \frac{h^2}{4} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]} - \sqrt{U_{e2}^2 - \left[ v_o^2 - h \frac{\partial v}{\partial y} v_o + \frac{h^2}{4} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]} \right\}.$$

Razvijanjem potkorenih veličina u binomni red oblika  $(1 + x)^n$  i analizom reda veličine pojedinih članova pokazuje se da se svi oni, osim efektivnih brzina, mogu zanemariti naročito pri mjerenju maksimalne vrijednosti gradijenta  $\frac{\partial U}{\partial y}$ . Konačno se dobija sledeći izraz za sračunavanje gradijenta:

$$\frac{\partial U}{\partial y} \approx \frac{1}{h} (U_{e1} - U_{e2}), \quad \dots(4.3)$$

koji je dovoljno tačan za procjenu njegove maksimalne vrijednosti.

Rotiranjem sonde za  $90^\circ$  oko ose x i korišćenjem predhodne analize dobija se izraz za sračunavanje gradijenta u pravcu ose z:

$$\frac{\partial U}{\partial z} \approx \frac{1}{h} (U_{e1} - U_{e2}). \quad \dots(4.4)$$

Sonda je baždarena u cilju odredjivanja konstanti  $A_i$ ,  $B_i$  i  $n_i$  koje figurišu u zakonu hladjenja  $E^2 = A_i + B_i U_{ei}^{n_i}$ . Usvojen je eksponent  $n = 0.5$ , s obzirom da se njegovom optimizacijom nije postiglo neko posebno poboljšanje i da se radi o procjeni maksimalne vrijednosti gradijenata. Eksperimentalni rezultati napona dobijenih poslije drugog stepena pojačanja u funkciji brzine, sobna temperatura pri

mjeranju, kao i naponi na ulazu i izlazu iz pojačivača, potrebni za sračunavanje njihovih mjernih karakteristika, su dati u dodatku br.2. Na osnovu dobijenih podataka određene su konstante  $A_i$  i  $B_i$ :

$$\begin{aligned} A_1 &= 0.43078, & B_1 &= 0.16943, \\ A_2 &= 0.31034, & B_2 &= 0.13829. \end{aligned}$$

Sonda je zatim postavljena u turbulentni granični sloj na različitim rastojanjima od zida i za svaki položaj su izmjereni:

1. Srednji naponi  $E_{mi} = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt$  u vremenskom intervalu  $T=3$  min
2. Srednja kvadratna vrijednost fluktuacije napona  $\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e^2(t) dt}$ ,
3. Promjena sobne temperature,
4. Maksimalna razlika trenutnih napona na senzorima.

Polazeći od zakona hladjenja u obliku

$$E^2 = A_i + B_i U_{ei}^{0.5},$$

i imajući u vidu da je :

$$E = E_m + e(t), \quad \text{.....(4.5a)}$$

$$U_{ei} = U_{emi} + u_e(t), \quad \text{.....(4.5b)}$$

dobija se sledeći izraz za srednju brzinu:

$$U_{em} = \left( \frac{E_m^2 - A_i}{B_i} \right)^2 + \frac{6E_m^2 - 2A_i}{B_i^2} \frac{1}{T} \int_0^T e^2(t) dt. \quad \text{.....(4.6)}$$

Na sličan način se može, ako se zanemare članovi  $\frac{1}{T} \int_0^T e^n(t) dt$  za  $n \geq 4$ , naći veza između srednje kvadratne vrijednosti fluktuacije napona i srednje kvadratne vrijednosti fluktuacije brzine u sledećem obliku:

$$\frac{1}{T} \int_0^T e^2(t) dt = \frac{1}{P_2^2 + 2P_1P_3} \frac{1}{T} \int_0^T u_e^2(t) dt - \frac{P_1^2}{P_2^2 + 2P_1P_3}, \quad \text{.....(4.7)}$$

gdje su:

$$P_1 = \left( \frac{E_m^2 - A_i}{B_i} \right)^2 - U_m,$$

$$P_2 = -\frac{4E_m}{B_i} (E_m^2 - A_i),$$

$$P_3 = \frac{1}{B_i^2} (6E_m^2 - 2A_i).$$

Ukoliko bi zakon hladjenja imao linearan oblik  $E = l_1 + l_2 U_e$ , što se može postići upotrebom dodatnog električnog kola - linearizera, onda izrazi (4.6) i (4.7) ne bi bili potrebni, jer bi trenutne i srednje vrijednosti napona i brzine bile povezane istim izrazom.

Eksperimentalni rezultati za svaki položaj sonde na različitim rastojanjima od zida su dati u dodatku br.2. Koristeći izraz (4.6) odredjen je tzv. "zakon zida" prikazan na sl.21, tj. funkcija:

$$U^+ = f(y^+), \quad \dots (4.8)$$

gdje je:

$$y^+ = \frac{U_\tau y}{\nu} - \text{bezdimeziona univerzalna koordinata,}$$

$$U_\tau^2 = \frac{\tau_w}{\rho} \quad (\text{m/s})$$

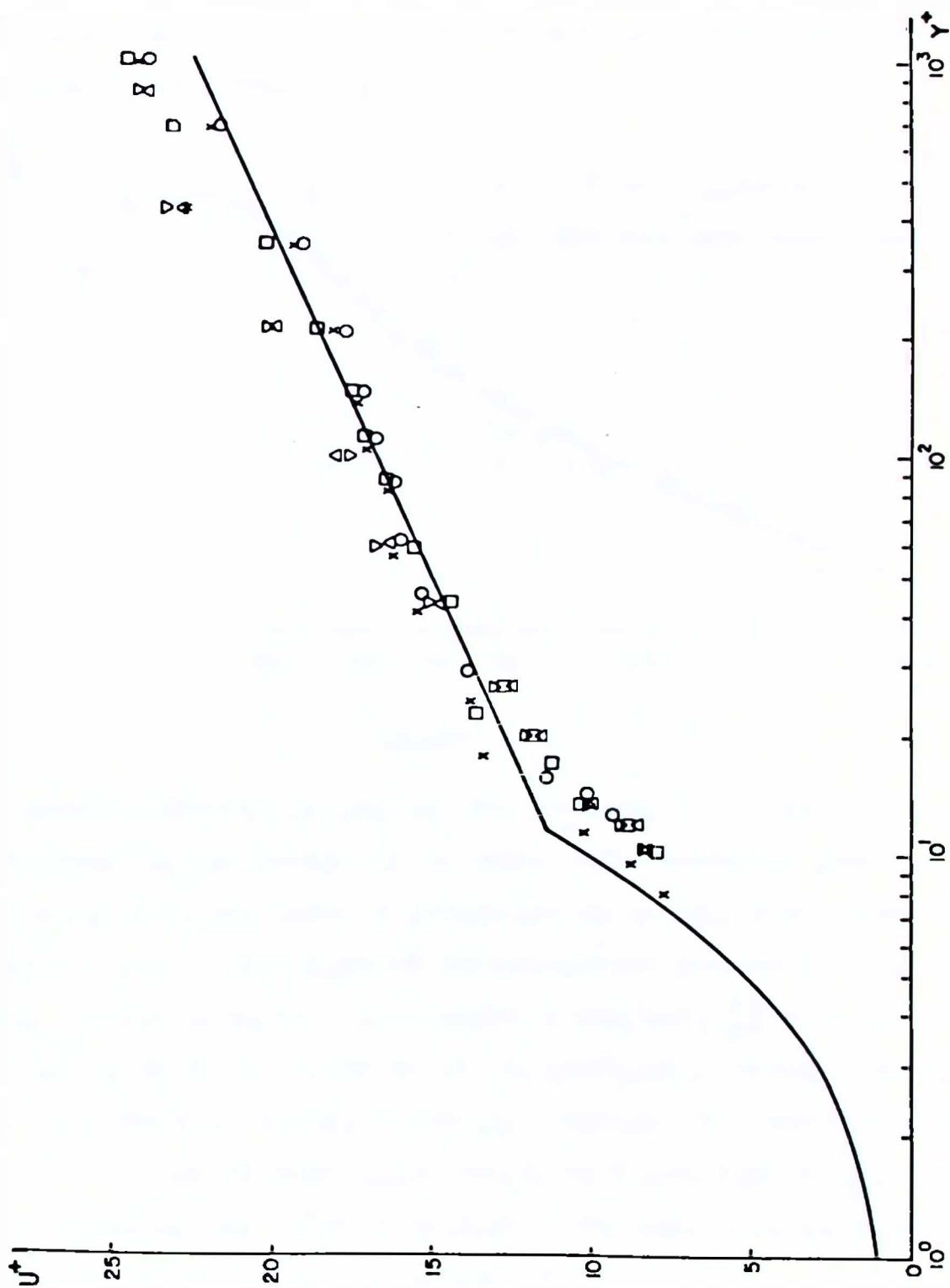
$$\tau_w \quad (\text{N/m}^2) - \text{tangenti napona na zidu,}$$

$$\nu \quad (\text{m}^2/\text{s}) - \text{koeficijent kinematske viskoznosti fluida,}$$

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau} - \text{bezdimeziona univerzalna brzina,}$$

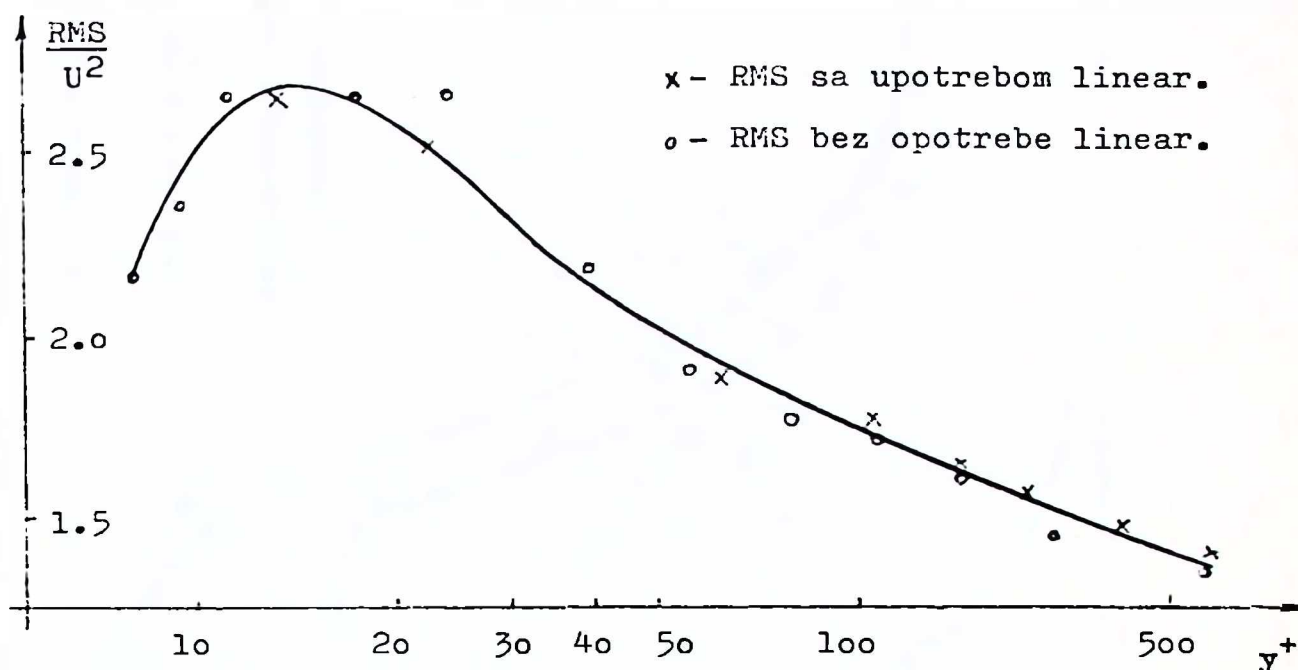
$$U_m = U_{em} - \text{srednja brzina strujanja u datom presjeku.}$$

Zakon zida je bio predmet istraživanja niza autora. Detaljan pregled svih predhodnih, kao i najnovije rezultate u toj oblasti je dao Spalding [52]. Njegovi rezultati se dobro slažu sa poznatim Karmanovim [40], takodje prikazanim na sl.21 (puna linija). Rezultati mjerenja ovom sondom za horizontalan položaj su označeni sa (o,x), a za vertikalni sa (Δ, ∇). Slaganje sa Karmanovim odnosno Spaldingovim rezultatima je veoma dobro što potvrđuje tačnost izvršenog mjerenja i izraza (4.6). Srednja vrijednost  $U_\tau$  odredjena eksperimentalnim putem je 0.1 m/s, što se veoma dobro slaže sa proračunskom vrijednošću od 0.11 m/s [39]. Srednja kvadratna fluktuacija brzine sračunata



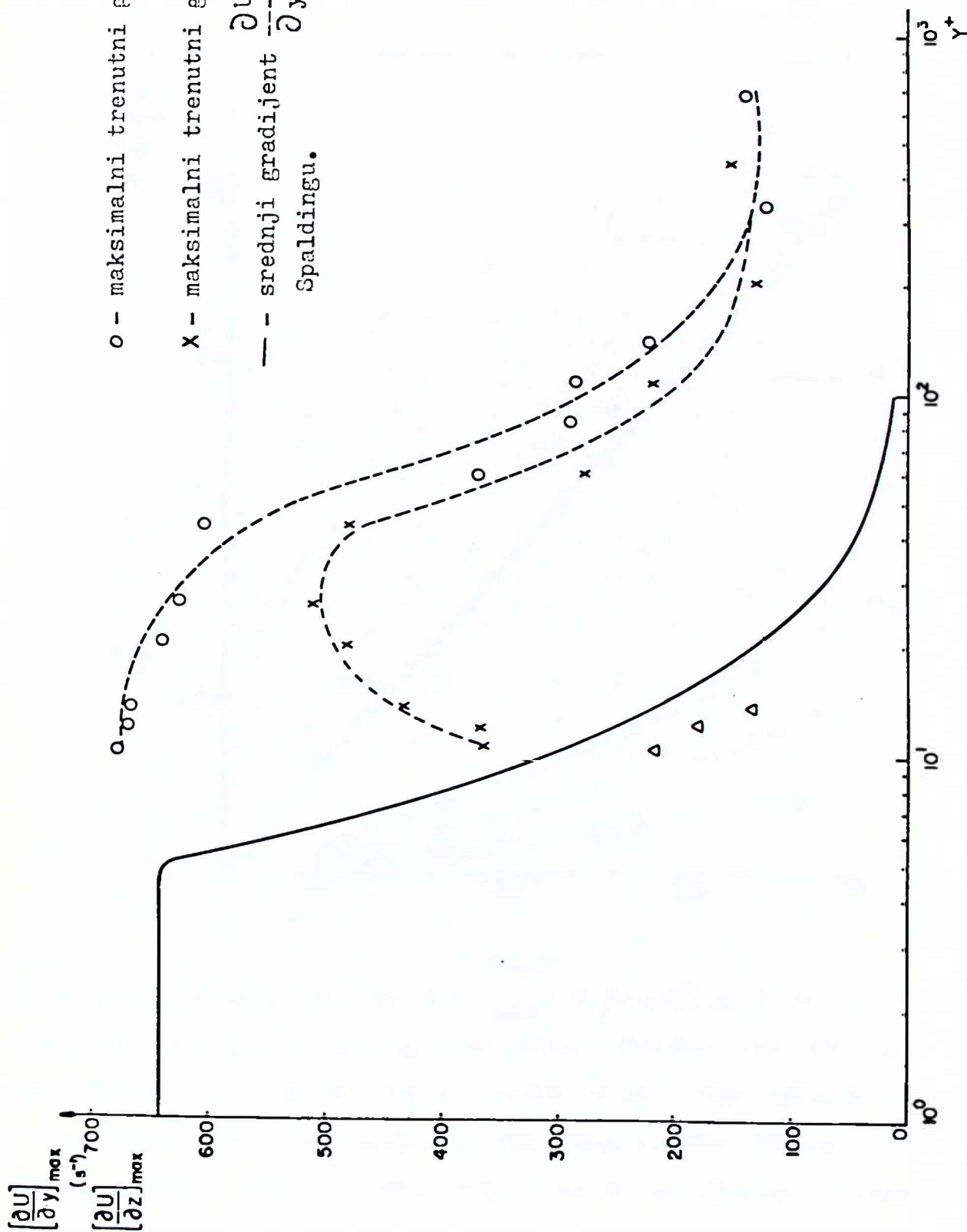
sl.21

pomoću izraza (4.7) je prikazana na sl.22 i upoređjena sa rezultatima dobijenim pomoću linearizera. Dobro slaganje dobijenih rezultata potvrđuje ispravnost izraza (4.7).



sl.22

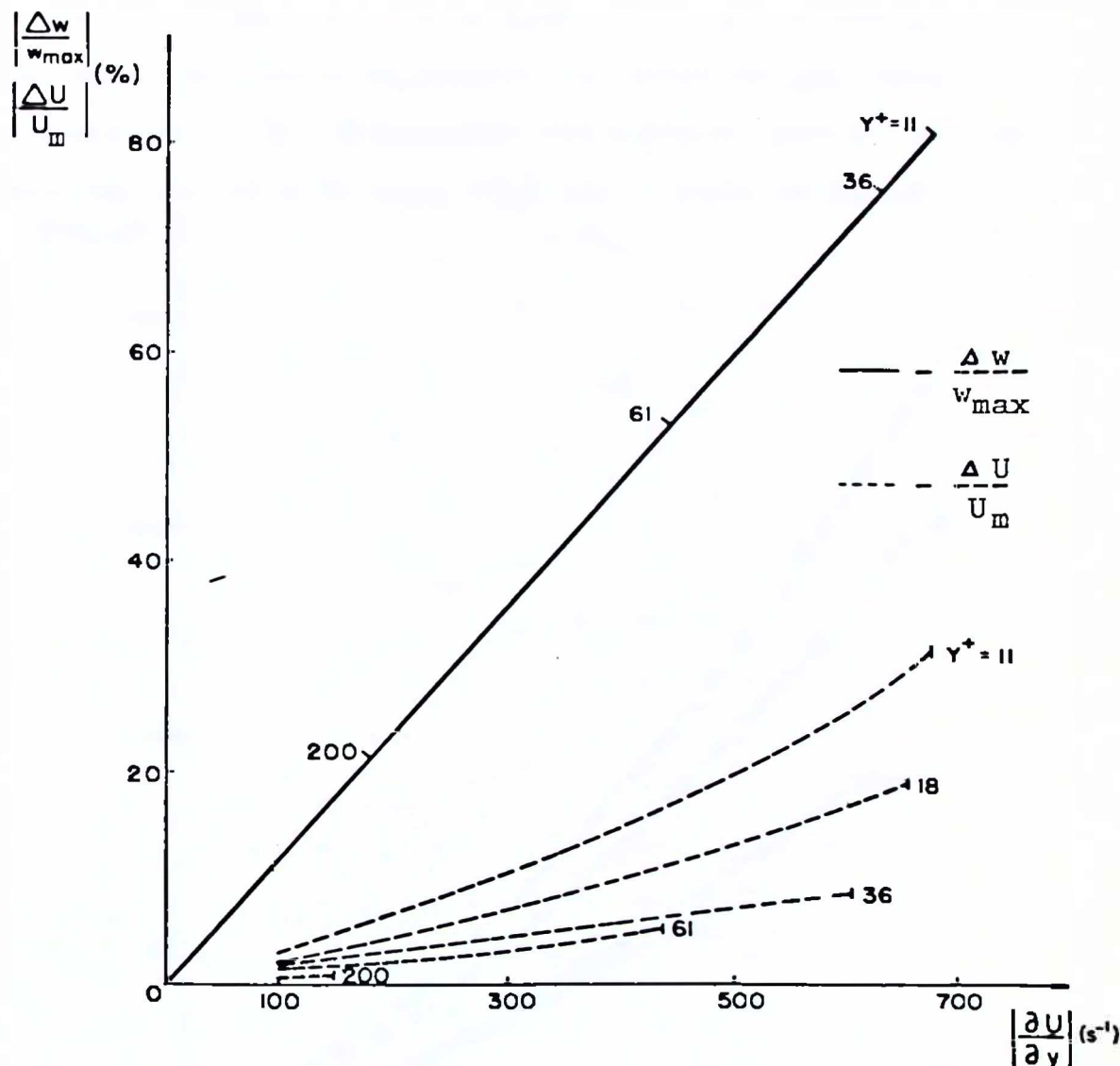
Na osnovu srednjih napona za oba senzora, kao i maksimalne razlike trenutnih napona odredjeni su maksimalni trenutni gradijenti  $\frac{\partial U}{\partial y}$  za različite položaje sonde i prikazani na sl.23. Rotiranjem sonde za  $90^\circ$  oko x - ose i ponavljanjem eksperimenta, ponovo je odredjen zakon zida za oba senzora i maksimalni gradijenti  $\frac{\partial U}{\partial z}$  koji su takodje prikazani na sl.21 i sl.23. Na sl.23 je prikazan i srednji gradijent u blizini zida koji su dobili Spalding i Karman. Na osnovu prikazanih rezultata se vidi da je maksimalna vrijednost gradijenta,  $\frac{\partial U}{\partial y} = 600 \text{ s}^{-1}$ , istog reda veličine kao srednji gradijent na zidu, što se slaže sa rezultatima Brodkey, Wallaca i Sharpe [38].



sl.23



Sl.24 ilustruje veoma ozbiljan uticaj koji ovaj gradijent može imati na mjerenje komponenta brzine, a samim tim i na mjerenje vrtloga.

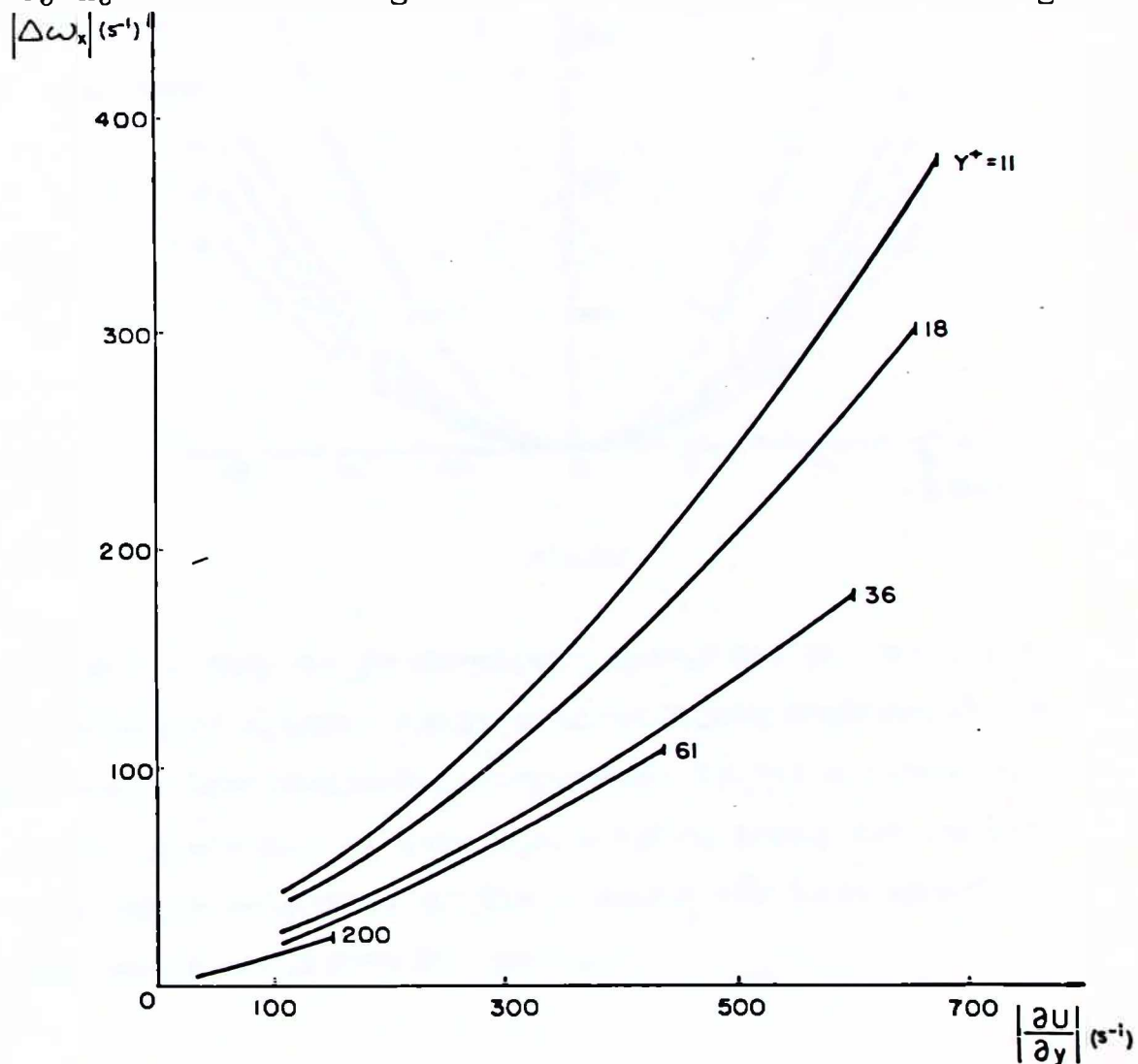


sl.24

Testiran je slučaj kada je  $w = w_{max} = U_m \sin 15^\circ$ , gdje je  $U_m$  poznata izmjerena srednja brzina na različitim rastojanjima od zida. Po moću izraza (3.8) sračunata je brzina  $w$ , sa i bez zanemarivanja poznatog maksimalnog gradijenta, i dobijena greška prikazana na sl.24. Step en porasta greške prema gradijentu se ne mijenja i maksimalna greška se kreće od 20% do 80% od  $w_{max}$ , sa smanjenjem  $y^+$  od 200 do 11. Imajući u vidu da ova greška praktično ne zavisi od veličine  $w$  ona može u datom trenutku biti veća od same brzine. Sličan proračun može biti izvršen i za komponentu brzine  $v$ . Dalje, relativna greška  $\frac{\Delta U}{U_m}$

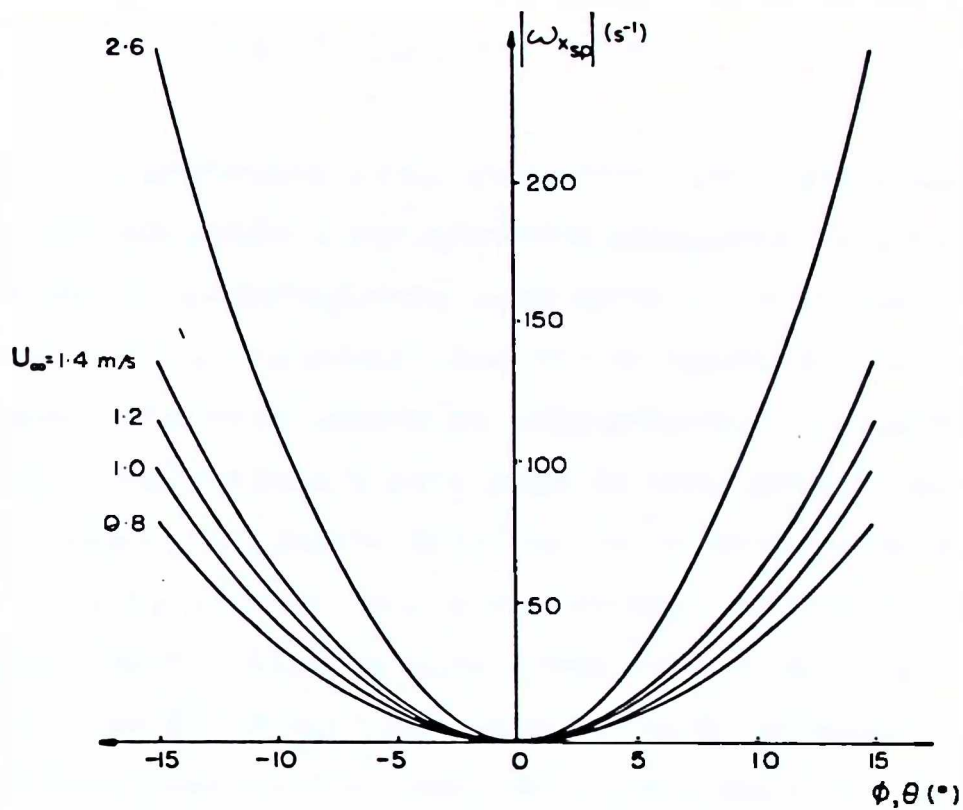
je, takodje, prikazana na sl.24. Stepen porasta i maksimalna greška rastu sa smanjenjem  $y^+$ .

Apsolutna greška koja se dobija pri proračunu  $\omega_x$ , kao posledica upotrebe netačnih vrijednosti za transvezalne komponente brzine, je prikazana na sl.25. Maksimalne vrijednosti greške na odgovarajućim rastojanjima od zida mogu biti čak i veće od maksimalne greške



sl.25

koja se pojavljuje kao posledica potpunog zanemarivanja transvezalnih komponenta, prikazane na sl.19 za  $U_m = 2.59 \text{ m/s}$  i sl.26 za ostale vrijednosti  $U_m$ .



sl.26

Imajući u vidu da je određena apsolutna greška pri mjerenju  $\omega_x$ , kao posledica zanemarivanja transvezalnih komponenata brzine ili gradijenata longitudinalne komponente brzine u ravni normalnoj na osu sonde, neophodno je odrediti u kojim granicama se kreće  $\omega_x$  da bi se odredila relativna greška, a samim tim dala konačna ocjena o upotrebljivosti analiziranih sondi.

## 5. PROCJENA VELIČINE KOMPONENTE VRTLOGA $\omega_x$ PRI STRUJANJU U TURBULENTNOM GRANIČNOM SLOJU

Pouzdanih eksperimentalnih podataka o veličini komponente vrtloga  $\omega_x$  pri strujanju u turbulentnom graničnom sloju za sada nema. Jedina sonda upotrebljavana u tu svrhu je bila Kovasznay-tip sonda koja, kao što je navedeno, ima niz nedostataka tako da se na rezultate postignute ovom sondom ne može pouzdano računati. Pokazalo se da ni sonda primijenjena u ovom radu ne može pružiti pouzdane podatke zbog uticaja gradijenata longitudinalne komponente brzine koji se ne mogu izbjeći. Postoje neki novi pokušaji mjerenja pomoću specijalnih malih loptica čija je specifična težina jednaka specifičnoj težini fluida i na čijim spoljnim površinama su ugrađena mala ogledala. Mjerenjem uglaone brzine zraka koji reflektuje ogledalo pomoću lasera moguće je, u principu, odrediti ugaonu brzinu loptice [53]. Čitav postupak je u fazi razvoja i ima niz nedostataka na čijem otklapanjanju se radi. Prema tome, tačne granice u kojima se kreće vrtlog još za sada nemoguće odrediti. Imajući to u vidu izvršen je pokušaj procjene maksimalne vrijednosti vrtloga u cilju odredjivanja relativne greške usled zanemarivanja transvezalnih komponenata brzine ili uticaja gradijenata.

Ukoliko se pokaže da je relativna greška mjerenja u odnosu na maksimalnu vrijednost vrtloga velika onda bi sonda bila praktično neupotrebljiva. U suprotnom bi bilo moguće upotrijebiti sondu za mjerenje maksimalnih vrijednosti vrtloga, kao i za mjerenje vrtloga manjih od maksimalnih sa odredjenom greškom.

Izolazeći od izraza (3.6) za slučaj  $v = w = 0$  ili  $v \approx w$ , dobija se sledeća relacija za odredjivanje vrtloga:

$$\omega_x = \frac{1}{2h \sin \alpha_e} [U_{e3} + U_{e1} - U_{e4} - U_{e2}]. \quad \dots(5.1)$$

Ukoliko bi zakon hlađenja  $U_e(E)$  bio linearan i približno istog oblika za sve senzore onda bi se gornji izraz sveo na sledeći oblik:

$$\omega_x \approx \frac{1}{2h \sin \alpha_e} [S_1 + S_2(E_3 + E_1 - E_2 - E_4)] \quad \dots(5.2)$$

Kada zakon hlađenja (2.20) nije linearna funkcija eksperimentalni rezultati (dodatak br.1) pokazuju da se on može približno aproksimirati linearnom funkcijom. U tom slučaju, na osnovu izraza (5.2), sledi da maksimalnoj vrednosti vrtloga odgovara maksimalna vrednost sume:

$$\Delta E_u = E_3 + E_1 - E_2 - E_4, \quad \dots(5.3)$$

ili uvođenjem srednjih i trenutnih vrednosti

$$\Delta E_u = E_{m3} + E_{m1} - E_{m2} - E_{m4} + \Delta E,$$

gdje je:

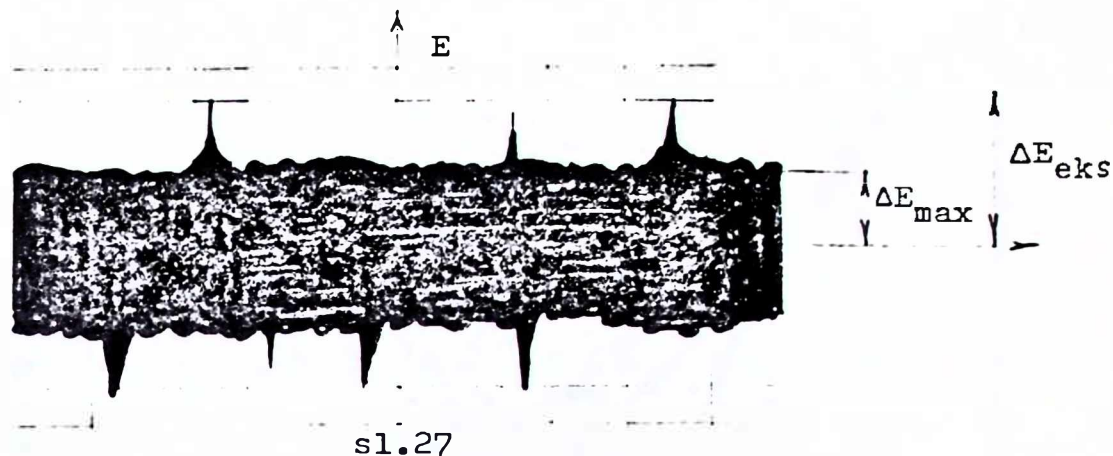
$$\Delta E = \Delta E_3 + \Delta E_1 - \Delta E_2 - \Delta E_4. \quad \dots(5.4)$$

Poznavajući  $(\Delta E_u)_{\max}$  može se približno sračunati  $\omega_{x,\max}$  (izraz (5.2)). Međutim, moguće je, polazeći od uslova  $v = w$ , odrediti relacije između  $\Delta E_1$ ,  $\Delta E_2$ ,  $\Delta E_3$  i  $\Delta E_4$ , a zatim koristeći izraz (5.1) i poznate srednje vrednosti napona, sračunati  $\omega_x$  bez pretpostavke o linearnom zakonu hlađenja. Niz do sada izvršenih mjerenja pokazuje da je vjerovatnoća za  $v \approx w \approx 0$  daleko veća od vjerovatnoće da ove komponente brzine imaju maksimalne vrednosti. Prema tome, treba očekivati da će rezultati mjerenja maksimalnog vrtloga  $\omega_{x,\max}$  u datom periodu vremena, uglavnom biti tačni s obzirom na malu vjerovatnoću pojave  $\omega_{x,\max}$  i  $v \gg w$  (ili  $w \gg v$ ) istovremeno. Maksimalna razlika napona

$$\Delta E_{\max} = (\Delta E_1 + \Delta E_3 - \Delta E_2 - \Delta E_4)_{\max} \quad \dots(5.5)$$

je mjerena sabiranjem i oduzimanjem sva četiri signala i memorisanjem dobijenog rezultata na ekranu osciloskopa. Poslije kraćeg vre-

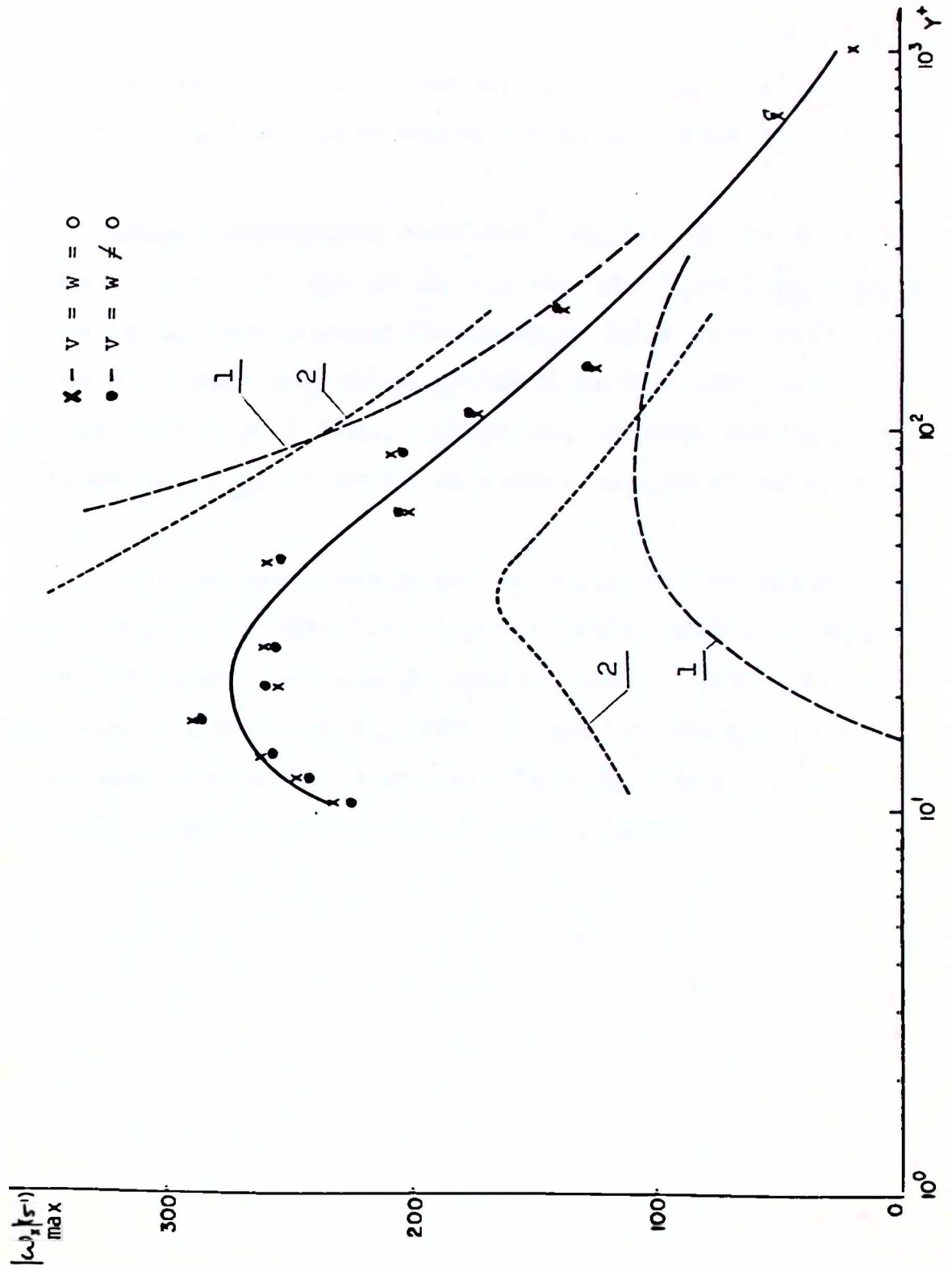
mena (15 s) dobijena je sledeća slika,



koja nije znatno mijenjala svoj oblik u narednom periodu. Sa prikazane slike se vidi da je maksimalna vrijednost  $\Delta E_{\max}$  uglavnom ustaljena, izuzev nekih ekstremnih vrijednosti veoma male frekvence. Detaljni eksperimentalni rezultati za  $\Delta E_{\max}$ ,  $\Delta E_{\text{eks}}$ , kao i za srednje vrijednosti napona su dati u dodatku br.3 za sva četiri senzora.

Na osnovu izraza (3.7) i (3.8) slijedi da za slučaj  $v \approx w \approx 0$  mora biti  $\Delta E_1 \approx \Delta E_3$  i  $\Delta E_2 \approx \Delta E_4$ . Variranjem  $\Delta E_1$  i  $\Delta E_2$  tako da bude zadovoljena jednakost (5.5) dobijene su približno iste vrijednosti za  $x_{\max}$  na datom rastojanju od zida. Slučaju  $v \approx w \neq 0$  odgovaraju uslovi  $\Delta E_1 \approx \Delta E_4$  i  $\Delta E_2 \approx \Delta E_3$ . Variranjem napona  $\Delta E_1$  i  $\Delta E_2$ , na način sličan predhodnom, tako da jednakost (5.5) bude zadovoljena, određeni su trenutni naponi koji odgovaraju maksimalnoj vrijednosti vrtloga na odgovarajućem rastojanju od zida i sračunata njegova vrijednost. Kao i u predhodnom slučaju, dobijeni su približno isti rezultati za sve kombinacije napona. Na sl.28 je prikazan maksimalni vrtlog u funkciji bezdimenzione koordinate za oba slučaja. Sa date slike se vidi da su dobijeni rezultati gotovo istovjetni, što je trebalo i očekivati, jer su analizirani slučajevi analogni. Na istoj slici je označeno i polje greške (kriva br.1) tj. polje u kome se može naći  $\omega_x$  usled zanemarivanja gradijenata  $\frac{\partial U}{\partial y}$  i  $\frac{\partial U}{\partial z}$ .





sl.28

Krivom br.2 je označeno polje greške usled zanemarivanja transvezalnih komponenata brzine. Polje je određeno na osnovu rezultata, prikazanih na sl.26, koji predstavljaju maksimalnu grešku usled zanemarivanja transvezalnih komponenata brzine na odgovarajućim rastojanjim od zida.

Na osnovu prikazanih rezultata slijedi da je za  $y^+ < 100$  bolje zanemariti  $v$  i  $w$ , dok su za  $y^+ > 100$  gradijenti  $\frac{\partial U}{\partial y}$  i  $\frac{\partial U}{\partial z}$  dovoljno mali tako da njihovo zanemarivanje daje bolje rezultate. Širina polja u kome se može naći  $\omega_x$  usled zanemarivanja transvezalnih komponenata brzine, za oblast  $y^+ < 100$ , je praktično jednaka maksimalnoj vrijednosti vrtloga  $\omega_{x,max}$ . što znači da relativna greška može biti 100% i više.

Na prvi pogled izgleda da je, s obzirom na ovakvu grešku, sonda neupotrebljiva. Međutim, iako trenutno izmjerene vrijednosti ne mogu biti pouzdane, ukoliko je vjerovatnoća pojave greške mala ipak se neke korelacione funkcije vrtloga mogu tačno mjeriti. Kao što je već navedeno, greška se pojavljuje kada je  $v \gg w$  ili  $w \gg v$  pa, prema tome, treba ispitati vjerovatnoću ove pojave.

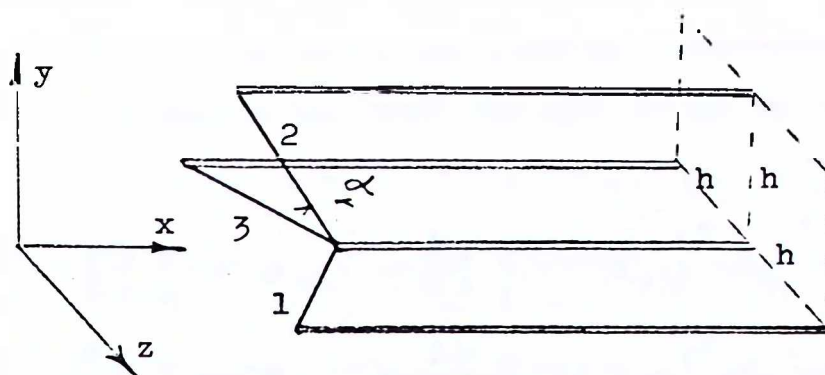
## 6. ODREĐJIVANJE VJEROVATNOĆE POJAVE GREŠKE PRI MJERENJU LONGITUDINALNE KOMPONENTE VRTLOGA USLED ZANEMARIVANJA TRANSVEZALNIH KOMPONENTA BRZINE

### 6.1 Konstrukcija i kalibracija sonde za istovremeno mjerenje sve tri komponente brzine

Na osnovu analize sprovedene u predhodnoj glavi slijedi da je neophodno izvršiti istovremeno mjerenje obje transvezalne komponente brzine po mogućnosti zajedno sa longitudinalnom komponentom. Pouzdanih rezultata istovremenog mjerenja sve tri komponente brzine do danas nema. U tom cilju je neophodno izraditi sondu sa najmanje tri senzora dovoljno malih dimenzija da bi uticaj gradijenata bio sveden na najmanju mjeru. Ideja za najoptimalniji oblik ovakve sonde je očavno poznata. Međutim, usled niza problema tehničke prirode, ova sonda je još uvijek u fazi razvoja. Najuspješnije rezultate u tom pravcu su postigli Wallace i Wosman [54]. Oni su uspjeli da prevaziđu sve probleme tehničke prirode i naprave sondu dovoljno malih dimenzija. Međutim, kalibracioni postupak koji su predložili je dao veoma loše rezultate. Pri testiranju sonde u poznatom indukovanom strujanju pokazalo se da relativna greška mjerenja brzine može biti 50% i više. Osnovni nedostaci njihovog postupka su bili u tome što uticaj transvezalne komponente brzine u pravcu normalnom na ravan koja obrazuje odgovarajući senzor sa njegovim nosačima, kao i uticaj aerodinamičkog blokiranja nijesu uzeli u obzir. Riješenje koje su oni predložili je bilo karakteristično po tome što je svaki senzor ležao u posebnoj ravni koja je nagnuta pod uglom od  $60^\circ$  u odnosu na ravni u kojima su smještene dva susjedna senzora.

Nije teško pokazati da je, u cilju prevazilaženja navedenih nedostataka, neophodno promijeniti oblik sonde i postaviti dva senzora u istoj ravni. Konstruisana je sonda koja zadovoljava ovaj uslov

i njena šema i fotografija dati na sl.29 i sl.30. Razstojanje medju nosačima senzora je  $h = 0.5 \text{ mm}$  a debljina senzora  $2.5 \mu\text{m}$ .



sl.29



sl.30

Nosači senzora su brušeni do prečnika od približno  $20 \mu\text{m}$  u cilju smanjivanja uticaja aerodinamičkog blokiranja, a zatim prevučeni slojem zlata, da bi se pad napona duž nosača sveo na najmanju moguću mjeru. Ovo je bilo od posebnog značaja za zajednički centralni nosač jer se pad napona duž ovog nosača, usled prolaza struje kroz bilo koji senzor, javljao kao lažni signal na ostala dva senzora. Ovaj problem

tzv. "cross talk" su analizirali Wosman i Wallace i predložili metod za njegovu korekciju. Pozlaćivanjem nosača ovaj uticaj je sveden na najmanju moguću mjeru ali ipak nije bio potpuno eliminisan, tako da je postupak "cross tok" korekcije primijenjen i u ovom slučaju.

Polazeći od rezultata analize sprovedene u odjeljku 2.2, može se za svaki senzor napisati sledeći izraz za efektivnu brzinu hladjenja:

$$U_{e1}^2 = \left[ \left( U + \frac{\partial U}{\partial z} \frac{h}{2} \right) \cos \alpha_{e1} + \left( w + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{h}{2} \right) \sin \alpha_{e1} \right]^2 + k_1 \left( v + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{h}{2} \right)^2, \quad \dots (6.1)$$

$$U_{e2}^2 = \left[ \left( U + \frac{\partial U}{\partial y} \frac{h}{2} \right) \cos \alpha_{e2} + \left( v + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{h}{2} \right) \sin \alpha_{e2} \right]^2 + k_2 \left( w + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{h}{2} \right)^2, \quad \dots (6.2)$$

$$U_{e3}^2 = \left[ \left( U - \frac{\partial U}{\partial z} \frac{h}{2} \right) \cos \alpha_{e3} + \left( w - \frac{\partial w}{\partial z} \frac{h}{2} \right) \sin \alpha_{e3} \right]^2 + k_3 \left( v - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{h}{2} \right)^2. \quad \dots (6.3)$$

Uglovi  $\alpha_{ei}$ ,  $i = 1, 2, 3$  su efektivni uglovi za svaki senzor. U ovom slučaju, za razliku od sonde sa četiri senzora, ovi uglovi ne moraju biti iste veličine. Koeficijenti  $k_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , su koeficijenti blokiranja za komponente brzine u pravcu normalnom na ravan koju obrazuju senzor i njegovi nosači. Imajući u vidu da su dimenzije ove sonde manje od dimenzija sonde sa četiri senzora i do nosači ove sonde nijesu savijeni na njihovim vrhovima kao u predhodnom slučaju, treba očekivati znatan uticaj aerodinamičkog blokiranja. Pored toga, zbog nesimetričnosti sonde može se očekivati, u opštem slučaju, zavisnost ovih koeficijenata od brzine ili u najboljem slučaju samo od njenog znaka.

Kombinovanjem jednačina (6.1), (6.2) i (6.3) mogu se dobiti sledeći izrazi za komponente brzina:

$$w = \frac{\cos \alpha_{e3} \sqrt{U_{e1}^2 - k_1 v^2} - \cos \alpha_{e1} \sqrt{U_{e3}^2 - k_3 v^2} - h \cos \alpha_{e1} \cos \alpha_{e3} \frac{\partial U}{\partial z}}{\sin(\alpha_{e1} + \alpha_{e3})} \quad (6.4)$$



$$U = \frac{\sin \alpha_{e3} \sqrt{U_{e1}^2 - k_1^2 v^2} + \sin \alpha_{e1} \sqrt{U_{e3}^2 - k_3^2 v^2}}{\sin(\alpha_{e1} + \alpha_{e3})} \quad \dots(6.5)$$

$$v = \frac{\sqrt{U_{e2}^2 - k_2^2 w^2} - (U + \frac{\partial U}{\partial y} \frac{h}{2}) \cos \alpha_{e2}}{\sin \alpha_{e2}} \quad \dots(6.6)$$

U gornjim izrazima su zanemareni priraštaji brzina usled gradijenata transvezalnih komponenata brzine jer se, razvijanjem potkorenih veličina po binomnoj formuli, može pokazati da je njihov uticaj zanemarljiv. Da bi dobijeni sistem jednačina bilo moguće riješiti moraju se zanemariti i gradijenti longitudinalne komponente brzine  $\frac{\partial U}{\partial y}$  i  $\frac{\partial U}{\partial z}$ . Time se ponovo nailazi na problem prisutan kod predhodne sonde sa četiri senzora. Međutim, dimenzije ove sonde su znatno umanjene tako da je i greška usled zanemarivanja ovih gradijenata manja nego u predhodnom slučaju. Ovo dolazi do izražaja naročito pri zanemarivanju priraštaja brzine usled gradijenta  $\frac{\partial U}{\partial y}$  jer je rastojanje centralnih djelova senzora u y-pravcu smanjeno za skoro tri puta. S obzirom da za sada ne postoji mogućnost izrade sonde ovog tipa manjih dimenzija, tačnost postignutih rezultata predstavlja optimum koji se trenutno može postići.

Izrazi (6.4), (6.5) i (6.6) se mogu uprostiti metodom sukcesivnih aproksimacija. Zanemarivanjem komponente brzine u pravcu normalnom na ravan koju obrazuje senzor sa svojim nosačima dobijaju se izrazi za prvu aproksimaciju:

$$w_1 = \frac{\cos \alpha_{e3} U_{e1} - \cos \alpha_{e1} U_{e3}}{\sin(\alpha_{e1} + \alpha_{e3})}, \quad \dots(6.7)$$

$$U_1 = \frac{\sin \alpha_{e3} U_{e1} + \sin \alpha_{e1} U_{e3}}{\sin(\alpha_{e1} + \alpha_{e3})}, \quad \dots(6.8)$$



$$v_1 = \frac{U_{e2} - U_1 \cos \alpha_{e2}}{\sin \alpha_{e2}} \quad \dots (6.9)$$

S obzirom da se zanemarenjem navedenih komponenata brzine zanemaruje i uticaj aerodinamičkog blokiranja, rezultati prve aproksimacije odgo varaju riješenju koje su dobili Wallace i Wosman. Izrazi koje su oni dobili, iako po svojoj suštini identični gore navedenim, bili su mnogo složeniji zbog drugačije geometrijske konfiguracije sonde.

Konstante  $A_i$  i  $B_i$  potrebne za određivanje efektivne brzine hladjenja, efektivni uglovi  $\alpha_{ei}$  i koeficijenti blokiranja su određeni eksperimentalnim putem na način izložen u glavi br.2. Detaljni eksperimentalni podaci i rezultati proračuna su dati u odjeljku br.4. Interesantno je napomenuti da su koeficijenti blokiranja u ovom slučaju funkcije brzine. Međjutim, oni se mogu smatrati konstantnim za negativne odnosno pozitivne smjerove transvezalnih komponenata brzine jer u tim oblastima neznatno variraju oko neke srednje vrijednosti. Dobijeni rezultati za ove koeficijente su dati u tab.4.

transv. komp.	senzor br.		
	1	2	3
> 0	1.923	1.780	2.087
< 0	2.704	1.222	1.169

tab.4

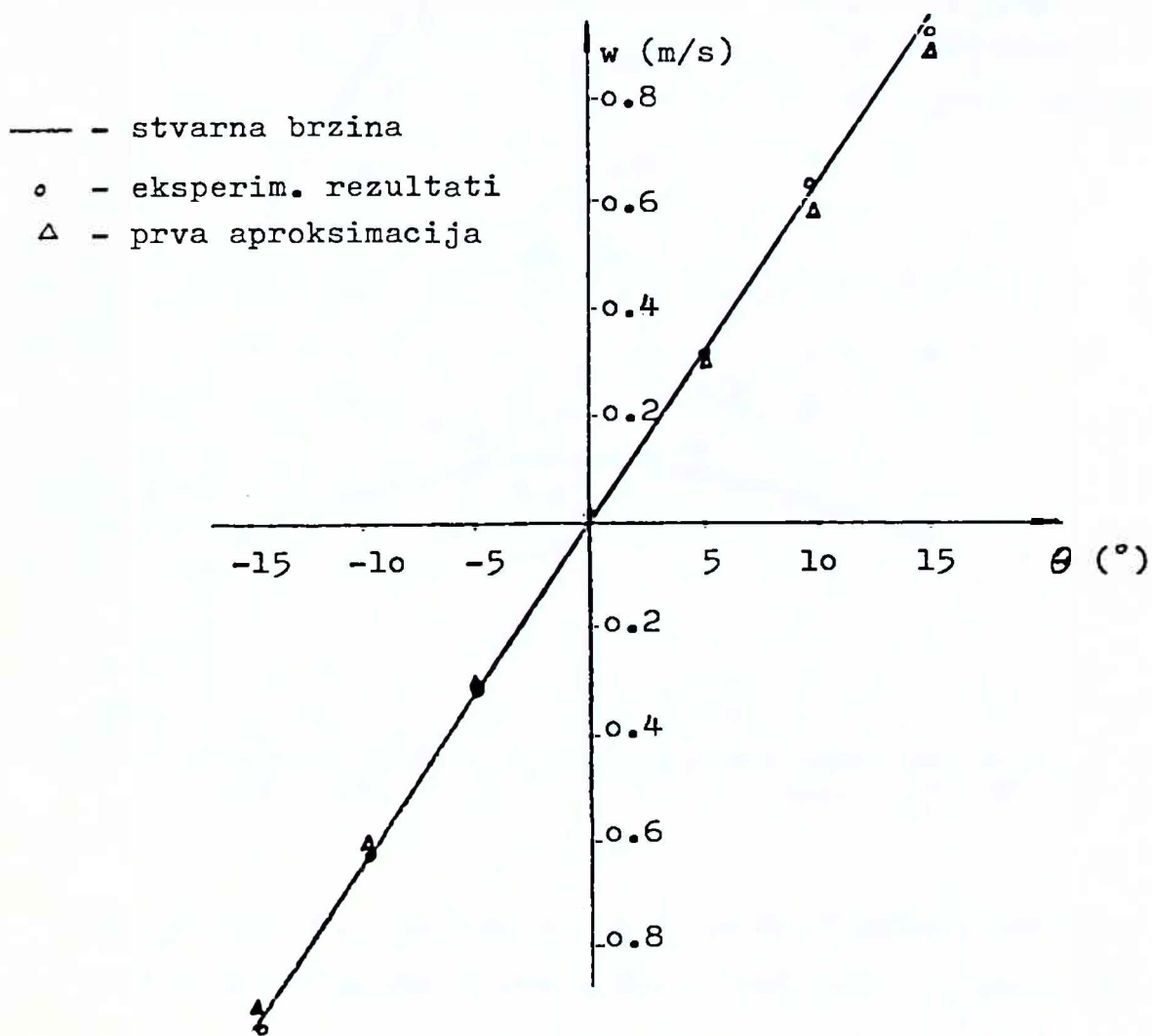
senz br.	1	2	3
$A_i$	0.6629	0.7135	0.5323
$B_i$	0.1709	0.2217	0.2066
$\alpha_{ei}$	22.90	31.08	27.39

tab.5

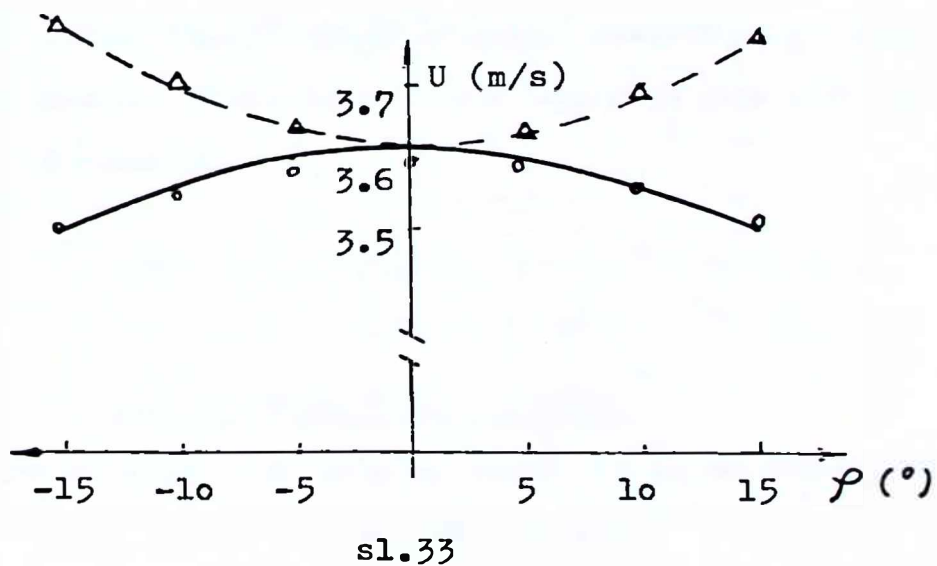
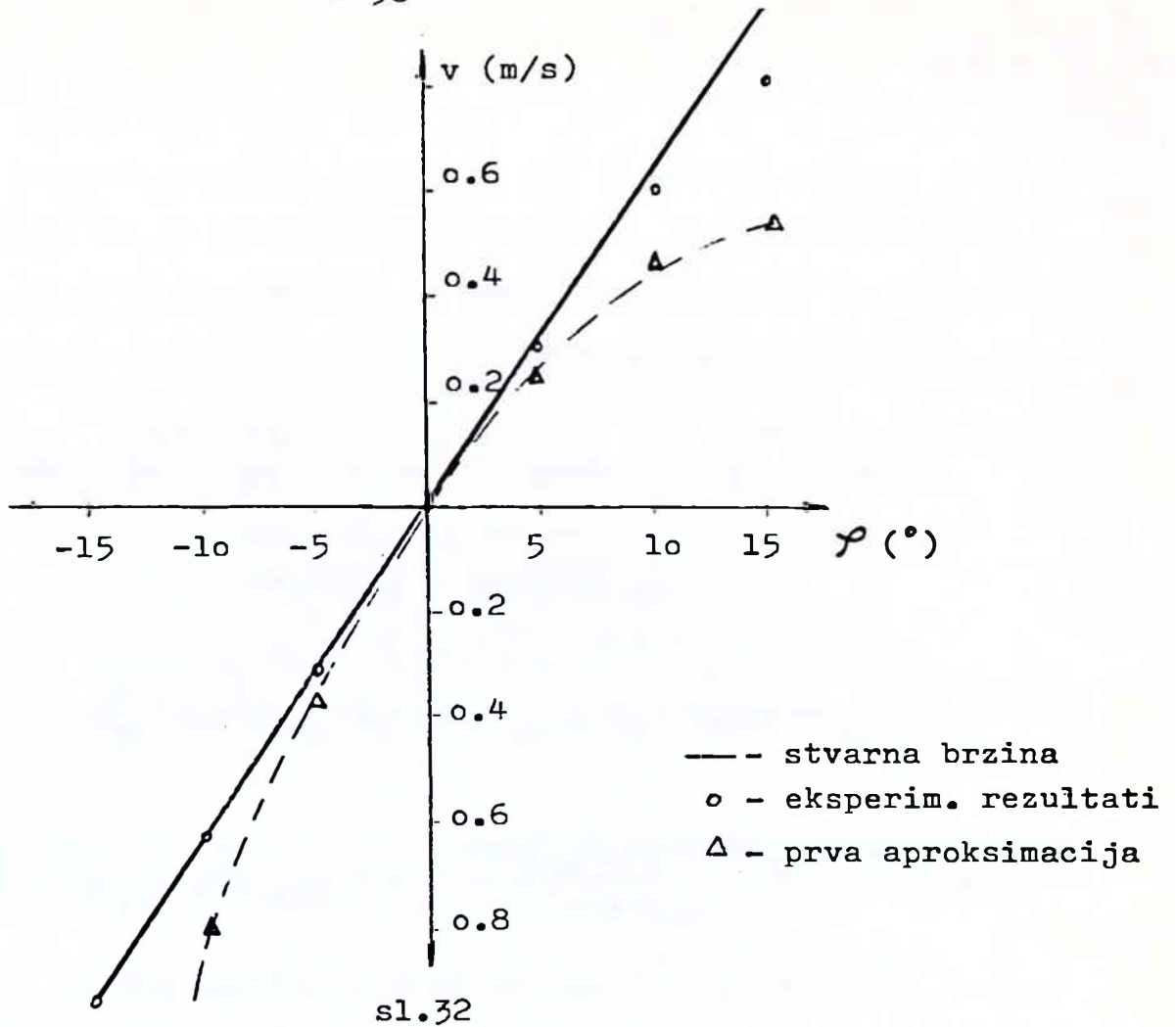
Pri proračunu, koji je izvršen sa eksponentom  $n = 0.5$ , analiziran je i uticaj tangente komponente hladjenja za svaki senzor sa koeficijentom  $k_t = 0.16$ , na način koji su predložili Champagne, Schleicher i

Werhmann [34]. Pokazalo se da je uticaj ove komponente potpuno zanemarljiv tj. da je obuhvaćen efektivnim uglom nagiba senzora.

Sa poznatim koeficijentima  $A_1$ ,  $B_1$  i  $n$  može se odrediti efektivna brzina hlađenja, a zatim, pomoću izraza (6.7), (6.8) i (6.9) i prve aproksimacije. Konačno se, koristeći izraze (6.4), (6.5) i (6.6), i imajući u vidu da su koeficijenti blokiranja poznati, mogu naći druge i sledeće aproksimacije. Pokazalo se da je postupak veoma konvergentan tako da su tri aproksimacije sasvim dovoljne. Na dijagramima sl.31, sl.32 i sl.33 su prikazani dobijeni rezultati mjerenja brzina i upoređeni sa poznatim indukovanim vrijednostima.



sl.31



Sa navedenih dijagrama se vidi da je slaganje stvarnih i eksperimentalnih vrijednosti veoma dobro. Isto tako, odstupanja koja pokazuje prva aproksimacija u odnosu na stvarne vrijednosti ukazuju na znatan uticaj komponentata brzine u pravcu normalnom na ravan koju

obrazuje senzor sa svojim nosačima kao i aerodinamičkog blokiranja.

Izraz (6.5) za komponentu brzine  $U$  je dobijen kombinovanjem jedn. (6.1) i (6.3). Ukoliko se umjesto njih podje od jednačina (6.1) i (6.2) dobija se sledeći izraz za prvu aproksimaciju komp. brzine  $U$

$$U_1 = \frac{\frac{\operatorname{ctg} \alpha_{e2}}{\sin \alpha_{e2}} k_3 \sqrt{U_{e1}^2 - k_2 w_1^2} - w_1 \sin \alpha_{e1} \cos \alpha_{e1} + \sqrt{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}}{\cos^2 \alpha_{e1} + k_3 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{e2}} \dots (6.10)$$

gdje je:  $L_1 = U_{e1}^2 (\cos^2 \alpha_{e1} + k_3 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{e2})$ ;  $L_2 = k_3 \cos^2 \alpha_{e1} \frac{U_{e1}^2 - k_2 w_1^2}{\sin^2 \alpha_{e2}}$ ;

$$L_3 = w_1^2 k_3 \sin^2 \alpha_{e1} \operatorname{ctg}^2 \alpha_{e2}; \quad L_4 = 2 \frac{\operatorname{ctg} \alpha_{e2} k_3 w_1 \sin \alpha_{e1} \cos \alpha_{e1}}{\sin \alpha_{e2}} \sqrt{U_{e2}^2 - k_2 w_1^2},$$

koji je po svojoj suštini sličan izrazu (6.8), međjutim, njegovom upotrebom se dobija nešto brža konvergencija. To se može objasniti time što u izrazu (6.10) imamo poznatu transvezalnu komponentu brzine  $w_1$ , dok izrazom (6.8) nije uzeta transvezalna komponenta brzine u prvoj aproksimaciji.

## 6.2 Analiza izraza za određivanje greške

U trećoj glavi je izveden izraz (3.6) za određivanje  $\omega_x$  eksperimentalnim putem u sledećem obliku:

$$\omega_x = \frac{1}{2h \sin \alpha_e} \left[ \sqrt{U_{e3}^2 - v_o^2} + \sqrt{U_{e1}^2 - v_o^2} - \sqrt{U_{e4}^2 - w_o^2} - \sqrt{U_{e2}^2 - w_o^2} \right]. \quad (6.12)$$

Razvijanjem potkorenih veličina u red po binomnoj formuli i zanemarivanjem članova višeg reda sledi:

$$\omega_x = \frac{1}{2h \sin \alpha_e} (U_{e1} + U_{e3} - U_{e2} - U_{e4}) + -\left(\frac{w^2}{U_{e2}} + \frac{w^2}{U_{e4}} - \frac{v^2}{U_{e1}} - \frac{v^2}{U_{e3}}\right), \quad (6.12)$$

odnosno,

$$\omega_x = \frac{1}{2h \sin \alpha_e} (U_{e1} + U_{e3} - U_{e2} - U_{e4}) + \xi_{\omega x}, \quad \dots(6.13)$$

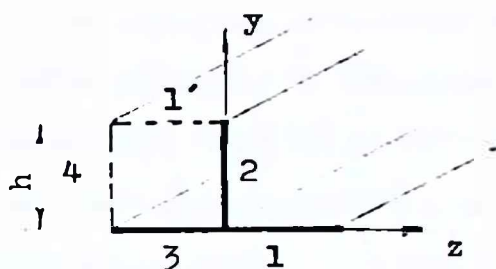
gdje:

$$\xi_{\omega x} = \frac{1}{4h \sin \alpha_e} \left(\frac{w^2}{U_{e2}} + \frac{w^2}{U_{e4}} - \frac{v^2}{U_{e1}} - \frac{v^2}{U_{e3}}\right), \quad \dots(6.14)$$

predstavlja uticaj transvezalnih komponenata brzine na longitudinalnu komponentu vrtloga. Apsolutna greška usled zanemarivanja ovog uticaja je analizirana u trećoj, a relativna u petoj glavi. Na osnovu izraza (6.14) se može zaključiti da će uticaj transvezalnih komponenata  $\xi_{\omega x}$  težiti nuli kada je  $w \approx v$ , s obzirom da je  $U_{ei} \gg v(w)$ . Isti zaključak slijedi i iz izraza (3.6) o čemu je bilo riječi u trećoj i petoj glavi. Analiza ovog uticaja odnosno greške usled njegovog zanemarivanja se može izvršiti mjerenjem vjerovatnoće pojave istovjetnih vrijednosti za  $v$  i  $w$  ili direktnim mjerenjem same greške. U prvom slučaju je dovoljno raspolagati sondom koja može istovremeno mjeriti obje transvezalne komponente brzine. Loša strana takvog postupka je u tome što nije moguće mjeriti i veličinu greške već samo vjerovatnoću njene pojave. U drugom slučaju je potrebno, osim transvezalnih komponenata brzine, mjeriti i sve četiri efektivne brzine hladjenja.

Sondom sa tri senzora je moguće mjeriti obje transvezalne komponente brzine istovremeno. S obzirom da je konfiguracija ove sonde različita od konfiguracije sonde sa četiri senzora za mjerenje vrtloga, nemoguće je istovremeno mjeriti sve četiri efektivne brzine hladjenja. Ukoliko se senzori br.2 i br.3 sonde sa tri senzora zamisle kao dva susjedna senzora sonde za mjerenje vrtloga, onda sli-

jedi zaključak da se sondom sa tri senzora mogu mjeriti i dvije efektivne brzine hlađenja. U cilju određivanja druge dvije efektivne brzine može se položaj preostala dva senzora zamisliti kao što je prikazano na sl.34.



sl.34

Rastojanje  $h$  medju sensorima može biti proizvoljno malo, tako da je priraštaj longitudinalne komponente brzine izmedju senzora br. 1 i br.4 odnosno br.3 i br.1' zanemarljiv. U tom slučaju, na osnovu izraza (3.7) i (3.8), poslije zanemarivanja kvadrata transvezalnih brzina, mogu se dobiti sledeće jednačine:

$$U'_{e1} = U_{e3} + 2w \sin \alpha_e, \quad \dots(6.15)$$

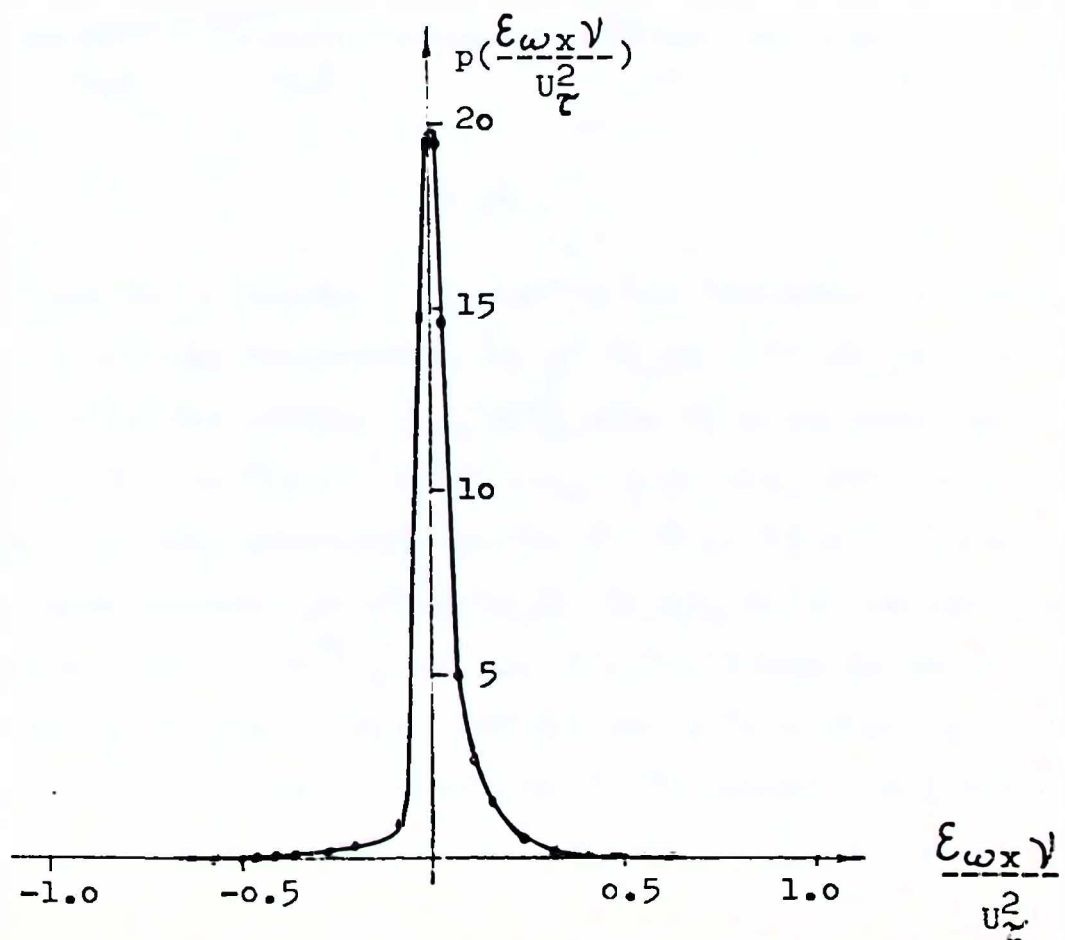
$$U_{e4} = U_{e2} - 2v \sin \alpha_e, \quad \dots(6.16)$$

kojima su definisane efektivne brzine hlađenja za senzore br.1' i br.4, sl.34. Kao što je navedeno u trećoj glavi, zanemarivanje kvadrata transvezalnih komponentata brzine u izrazima za njihovo određivanje nema gotovo nikakvog uticaja na tačnost, pa se izrazi (6.15) i (6.16) mogu smatrati dovoljno tačnim. Smjenom ovih izraza u jedn. (6.14) dobija se konačna relacija za određivanje greške:

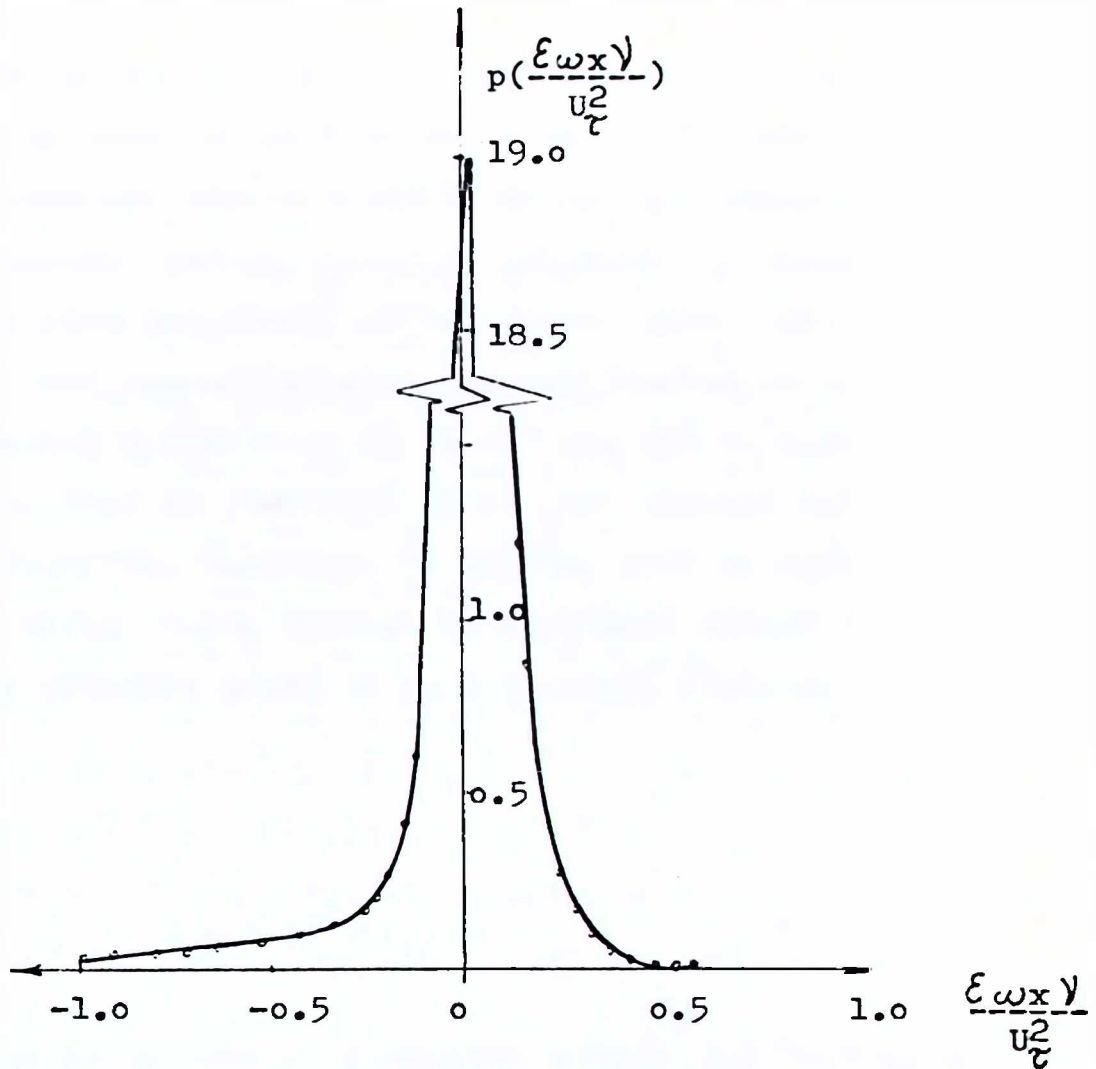
$$\xi_{\omega x} = \frac{1}{4h \sin \alpha_e} \left( \frac{w^2}{U_{e2}} + \frac{w^2}{U_{e2} - 2v \sin \alpha_e} - \frac{v^2}{U_{e3}} - \frac{v^2}{U_{e3} + 2w \sin \alpha_e} \right). \quad \dots(6.17)$$



Sve veličine koje ulaze u izraz (6.17) se mogu odrediti pomoću sonde sa tri senzora. Imajući to u vidu, sonda je postavljena na različitim rastojanjima od zida u turbulentnom graničnom sloju i izvršeno mjerenje pada napona na sva tri senzora u funkciji od vremena. Podaci su registrovani na magnetnoj traci ( po jedan kanal za svaki senzor), a zatim je analogni signal transformisan u digitalni sa frekvencom od 1280 Hz. Ova frekvencija je veća od maksimalne frekvence koja se može pojaviti u turbulentnom strujanju u kome je vršeno mjerenje. Koristeći kompjuter UNIVAK 1108 izvršen je istovremeni proračun sve tri komponente brzine u funkciji od vremena, kao i greške usled zanemarivanja transvezalnih komponentata brzine ( izraz (6.17)). Vjerovatnoća pojave ove greške je prikazana na sl.35 i sl.36.



sl.35



sl.36

Na obje slike su prikazani isti rezultati, izmjereni na rastojanju  $y^+ = 20$ , u različitim razmjerama. Sa sl.35 se vidi da je vjerovatnoća pojave bezdimenzione greške  $\xi\omega_x\gamma/U_\tau^2$ , veće od 0.10, veoma mala. S obzirom da je  $\gamma = 0.155 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  i  $U_\tau = 0.10 \text{ m/s}$ , ovoj bezdimenzionoj greški odgovara apsolutna greška od  $\xi\omega_x = 65 \text{ s}^{-1}$ . Ova greška je daleko ispod maksimalne vrijednosti za  $\omega_x$  koja, na rastojanju  $y^+ = 20$ , iznosi oko  $300 \text{ s}^{-1}$  (vidi sl.28). Očigledno je da je najveća vjerovatnoća da će greška biti jednaka nuli. Međutim, sa sl.36 se vidi da postoji izvjesna vjerovatnoća da bezdimenziona greška bude jednaka 0.5, što odgovara apsolutnoj greški od  $\xi\omega_x = 300 \text{ s}^{-1}$  i više.

To znači da greška može biti jednaka maksimalnoj vrijednosti  $\omega_x$  ili, iako sa veoma malom vjerovatnoćom, i dva puta veća od nje.

Konačno se može zaključiti da su, pri zanemarenju transvezalnih komponenata brzine, trenutno izmjerene vrijednosti vrtloga nepouzdana, zbog mogućnosti pojave greške istog reda veličine kao maksimalna vrijednost mjerenog vrtloga. Imajući u vidu malu vjerovatnoću pojave greške veće od  $6\sigma$  ili 20% od maksimalne vrijednosti vrtloga, može se očekivati da se neki momenti vrtloga mogu tačno mjeriti. Međutim, činjenica da greška, iako sa malom vjerovatnoćom, može biti veoma velika ukazuje na mogućnost pojave relativno velike greške pri mjerenju nekog od ovih momenata (korelacija).

## Z A K L J U Č A K

Mada je potreba za mjerenjem vrtloga pri turbulentnom strujanju uočena već dugo vremena i postavljena kao prioritetan eksperimentalni cilj, rezultati kojima se danas raspolaže su veoma ograničeni. Problem prvenstveno leži u teškoćama na koje se nailazi pri konstrukciji dovoljno male sonde koja bi mogla mjeriti vrtloge najmanje razmjere i čiji bi signal bio osjetljiv samo na vrtlog. Do sada postojeća Kovasznay-tip sonda je bila karakteristična ne samo po velikim dimenzijama već i po grešci koja se pojavljivala kao rezultat uticaja brzine strujanja na signal za mjerenje vrtloga. Niz autora je eksperimentalnim putem dokazalo da transvezalne komponente brzine imaju znatan uticaj na tačnost mjerenja. Tako npr. prisustvo ovih komponenata u jednolikoj bezvrtložnoj struji izaziva pojavu lažnog signala za određivanje vrtloga. U ovom radu je izvršena teorijska

analiza ovog uticaja i lažni signal odredjen prvo računskim, a zatim eksperimentalnim putem. Analitičkim putem je dokazano da bi ovaj uticaj mogao biti uzet u obzir ukoliko bi sonda bila u stanju da mjeri obije transvezalne komponente brzine istovremeno.

Konstruisana je nova sonda dovoljno malih dimenzija. Izvršene su potrebne izmjene u odnosu na Kovasznay-tip sondu koje su obećavale prevazilaženje problema karakterističnih za ovu sondu. U prvom redu nova sonda je bila, u principu, u stanju da mjeri transvezalne komponente brzine i uzme u obzir njihov uticaj pri sračunavanju longitudinalne komponente vrtloga. To je postignuto povećanjem broja nosača senzora i uključivanjem svakog senzora u posebno električno kolo. Iako je ova sonda po svom obliku daleko složenija i manja od Kovasznay-tip sonde tehnički problemi pri izradi iste su uspješno prevaziđeni. Medjutim, pokazalo se da greška pri mjerenju vrtloga ovom sondom može biti velika bez obzira da li se uticaj transvezalnih komponenta brzine uzima u obzir ili ne. U oblasti od posebnog interesa  $y^+ < 100$  ova greška može biti istog reda veličine kao i maksimalna stvarna vrijednost vrtloga.

Greška se pojavljuje i pored uzimanja transvezalnih komponenta brzine u obzir zato što je iste nemoguće tačno mjeriti. Razlog za ovo leži u tome što uticaj gradijenata brzine  $\partial U / \partial y$  i  $\partial U / \partial z$  ne može biti mjeren sondom ovakvog tipa. Smatralo se da je uticaj ovih gradijenata zanemarljiv i na toj pretpostavci su zasnovane sve postojeće sonde za mjerenje transvezalnih komponenta brzine. Od takve pretpostavke se pošlo i pri konstrukciji sonde kojom su vršena mjerenja. Medjutim, izvedeni eksperimenti i teorijske analize pokazuju da zanemarivanje uticaja ovih gradijenata može izazvati relativno veliku grešku (80% i više) pri mjerenju transvezalnih komponenta brzine. Uzimanje u obzir ovako netačno odredjenih transve-

zalnih komponenata može, s druge strane, pri mjerenju vrtloga izazvati relativnu grešku do 100% i više.

Prema tome, radi se o nedostatku koji nije karakterističan samo za primijenjenu sondu već za sve sonde tzv. X - tipa, koje su našle široku primjenu za mjerenje transvezalnih komponenata brzine. Dobijeni rezultati ukazuju na to da bi sve rezultate postignute ovakvim sondama trebalo preispitati. Mada još nekoliko radova ukazuje na ovu problematiku (kad su u pitanju X - tip sonde), ipak još uvijek ne postoji jedinstveno mišljenje po tom pitanju.

Maksimalna greška pri mjerenju longitudinalne komponente vrtloga usled zanemarivanja transvezalnih komponenata brzine je u oblasti  $y^+ < 100$  manja od greške koja se pojavljuje pri uzimanju njihovih netačno odredjenih vrijednosti. Iako je relativna vrijednost ove greške veoma visoka do 100% i više, u cilju donošenja konačnog zaključka o upotrebljivosti sonde odredjena je vjerovatnoća pojave ove greške. Za tu svrhu je konstruisana specijalna sonda sa tri senzora kojom je, po prvi put, bilo moguće istovremeno mjerenje sve tri komponente brzine, što je od posebnog značaja za proučavanje turbulentnog strujanja. Eksperimentalnim putem je utvrđeno da je najveća vjerovatnoća za pojavu relativno male greške manje od 20%. Međutim, iako mala, ipak postoji vjerovatnoća za pojavu greške od 100%, pa čak i više. Prema tome, ne samo trenutne vrijednosti već i korelacione funkcije vrtloga, dobijene eksperimentalnim putem upotrebom sonde sa četiri senzora, su nepouzđane.

Prevazilaženje postojećih problema bi se u principu moglo izvesti smanjivanjem rastojanja između senzora i svodjenjem uticaja gradijenata tim putem na minimum. Ovo je moguće ostvariti jedino kod X - sonde za mjerenje jedne od transvezalnih komponenata brzine, dok je minimalno rastojanje kod sonde sa četiri senzora za mjerenje vrtloga

ga ograničeno dužinom i debljinom senzora i za sada se ne može ići ispod postignutog minimuma. Pored toga, ovo smanjivanje povećava opasnost od termalne kontaminacije pa bi i o ovoj pojavi, o kojoj nema pouzdanih eksperimentalnih podataka, trebalo posebno voditi računa. Obavljena mjerenja ukazuju na veoma ozbiljan uticaj termalne kontaminacije čak i za relativno velika rastojanja izmedju senzora.

Konačno riješenje problema vezanih za mjerenje vrtloga bi bilo u konstrukciji takve sonde koja bi mogla mjeriti sve tri komponente brzine, kao i njihove gradijente u ravni normalnoj na pravac strujanja. Ovakva sonda bi trebalo da ima devet senzora smještenih na relativno malom rastojanju. Ona bi, ustvari, predstavljala kombinaciju od tri istovjetne sonde (sa po tri senzora) prikazane u ovom radu. Problemi tehničke prirode koji se pojavljuju pri konstrukciji ovakve sonde su već prevaziđjeni [54]. Medjutim, postupak kalibracije primijenjen u navedenom radu je dao negativne rezultate koji su bili karakteristični ne samo za cijelu sondu već i za svaki od njenih elemenata (sonde sa tri senzora) posebno. Imajući u vidu da su nedostaci vezani za njene elemente prevezidjeni zahvaljujući eksperimentalnim rezultatima i analizi datoju u ovom radu, treba očekivati da sondom sa devet senzora uskoro budu postignuti zadovoljavajući rezultati.



L I T E R A T U R A

- <sup>1</sup> M.J. Lighthill, in Laminar Boundary Layers, edited by L. Rosenhead (Oxford University Press, Oxford, 1963), chap. II.
- <sup>2</sup> W.W. Willmarth, in Advances in Applied Mechanics, edited by C.S. Yih (Academic Press, New York, 1975), Vol. 15, p. 159.
- <sup>3</sup> J. Laufer, in Annual Review of Fluid Mechanics, edited by M. Van Dyke and W.G. Vincenti (Annual Reviews, Inc., Palo Alto, 1975), Vol. 7, p. 307.
- <sup>4</sup> P. Saffman, Bull. Am. Phys. Soc. 23, 988 (1978).
- <sup>5</sup> S.J. Kline, W.C. Reynolds, F.A. Schraub and P.W. Runstadler, J. Fluid Mech. 30, 741 (1967).
- <sup>6</sup> H.T. Kim, S.J. Kline and W.C. Reynolds, J. Fluid Mech. 50, 133 (1971).
- <sup>7</sup> S.G. Nychas, H.C. Hershey and R.S. Brodkey, J. Fluid Mech. 62, 223 (1974).
- <sup>8</sup> G.R. Offen and S.J. Kline, J. Fluid Mech. 62, 223 (1974).
- <sup>9</sup> G. Brown and A. Roshko, AGARD CPP-93, 23, 1 (1971).
- <sup>10</sup> C. Winant and F.K. Browand, J. Fluid Mech. 63, 237 (1974).
- <sup>11</sup> J. Laufer, Volume in onore di Carlo Ferrari (ed. Lavrotto and Bella), 435 (1971).
- <sup>12</sup> D.D. Papailiou and P.S. Lykondis, J. Fluid Mech. 62, 11 (1974).
- <sup>13</sup> A.A. Townsend, Proc. Cambridge Phil. Soc. 47, 375 (1951).
- <sup>14</sup> H.P. Bakewell and J.L. Lumley, Phys. Fluids 10, 1880 (1967).
- <sup>15</sup> W.W. Willmarth and B.J. Tu, Phys. Fluids 9, S134 (1967).

- <sup>16</sup> A.K. Gupta, Ph.D. dissertation (The University of Southern California, 1970).
- <sup>17</sup> E.G. Kastrinakis, J.M. Wallace, W.W. Willmarth, B. Ghorashi and R.S. Brodkey, Lect. Notes Phys. 75, 175 (1978).
- <sup>18</sup> R.F. Blackwelder and H. Eckelmann, J. Fluid Mech. 94, 577 (1979).
- <sup>19</sup> L.S.G. Kovasznay, Quar. Prog. Rep. of Aero Dept. Contract NORD-8036-JHB-3D, The Johns Hopkins University (1950).
- <sup>20</sup> L.S.G. Kovasznay, Physical Measurements in Gas Dynamics and Combustion (Princeton University Press, Princeton 1954), p. 227.
- <sup>21</sup> M.S. Uberoi and S. Corrsin, Prog. Rep. for Contract NAW 5504 for NACA, The Johns Hopkins University (1951).
- <sup>22</sup> A.L. Kistler, M.S. Thesis, The Johns Hopkins University (1952).
- <sup>23</sup> S. Corrsin and A.L. Kistler, NACA Rep. 1244 (1955).
- <sup>24</sup> E.G. Kastrinakis, H. Eckelmann and W.W. Willmarth, Rev. Sci. Instrum. 50, 759 (1979).
- <sup>25</sup> W.W. Willmarth and S.S. Lu, J. Fluid Mech. 55, 481 (1971).
- <sup>26</sup> J.C. Wyngaard, J. Sci. Instrum. 2, 983 (1969).
- <sup>27</sup> E.G. Kastrinakis, MPI für Strömungsforschung Göttingen, Bericht 5/1977 (1977).
- <sup>28</sup> W.G. Cleveland, M.S. Thesis (The University of Maryland, 1979).
- <sup>29</sup> H. Tennekes and J.L. Lumley, A First Course in Turbulence (MIT Press, Cambridge, Mass., 1972), p. 159.
- <sup>30</sup> G.B. Schubauer and P.S. Klebanoff, NACA ACR5K27 (1946).
- <sup>31</sup> N.K. Tutu and R. Chevray, J. Fluid Mech. 71, 785 (1975).
- <sup>32</sup> P.D. Weidman and F.K. Browand, J. Phys. E: Sci. Instrum 8, 553 (1975).

- 33 H.-P. Kreplin and H. Eckelmann, Phys. Fluids 22, 1210 (1979).
- 34 F.H. Champagne, C.A. Sleicher and O.H. Wehrmann, J. Fluid Mech. 28, 153 (1967).
- 35 A. Strohl and G. Comte-Bellot, J. Appl. Mech. Trans ASME (1973).
- 36 W.W. Willmarth and T. Bogar, Phys. Fluids 20, S9 (1977).
- 37 H. Eckelmann and S.G. Nychas, Phys. Fluids 20, S225 (1977).
- 38 L.K. Sharma, Ph.D. Dissertation (The University of Michigan, 1980).
- 39 H. Schlichting, Boundary Layer Theory (McGraw-Hill, New York, 7th Edition 1979), p. 636.
- 40 T. von Karman, Trans. ASME 61, 705(1939).
- 41 Bernard, P. (1980), SIAM J. Appl. Math., 38, 81.
- 42 Wallace, J.M., Brodkey, R.S. and Eckelmann, H. (1977), J. Fluid Mech. 83, 673.
- 43 Bruun, H.H. & Tropea, C., Calibration of normal, inclined and X - array hot-wire probes, Sonderforschungsbereich 80, Univesitat Karlsruhe, Nov. 1980.
- 44 Bruun, H.H. and Tropea, C., 1979: The SFB 80 Nozzle Calibration Facility, Sonderforschungsbereich 80, Universitat Karlsruhe.
- 45 Corrsin, S., Turbulence: experimental methods. Handbuch der Physik. Vol.8, Part 2, Berlin 1963.
- 46 Collis, D. C. and Williams, M. J., Two-dimensional convection from heatid wires at low Reynolds numbers, J. Fluid Mech. 6, 195
- 47 Bruun, H.H., Interpretation of a Hot-Wire Signal Using a Univers Calibration Law, J. Sci. Instr., Vol.4, 1971.
- 48 Champagne, F.<sup>n</sup>., Schleicher, C.A. and Wehrmann, O.H., Turbulence measurements with inclined hot wires, Parts 1 and 2, J. Fl. Mech 28, 153, 1967.

- 49 Freihe, C.A. and Schwartz, W.H., Deviation from the cosine law for yawed cylindrical anemometer sensors. Trans. A.S.M.E. 35E, 655, 1968.
- 50 Bradshaw, P., An Introduction to Turbulence and its Measurements, Pergamon Press, Oxford, 1975.
- 51 Jorgensen, F.E., Directional Sensitivity of Wire and Fiber-film probes, DISA Information No. 11, pp. 31-37, 1971.
- 52 Spalding, D.B., A Single Formula for the Law of the Wall, J. of Applied Mech., pp.455, 1961.
- 53 Frisch, M.B. and Webb, W.W., Bull. Am. Phys. Soc. 24, 1143, 1971.
- 54 Wassman W.W. and Wallace J.M., A Multi-sensors Hot-Wire Probe for Measuring the Velocity and Vorticity Components, EUROMECH 132, Lyon, 1980.

DODATAK br.1

Eksperimentalni rezultati mjerenja napona potrebnih za određivanje  
korekcije usled promjene sobne temperature

položaj sonde	naponi na drugom st. poj. E(V)				temperatura (°C)		
	senzor br.				t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t
φ	1	2	3	4			
o	1.682	1.334	1.494	1.334	24.85	25.00	24.925
o	1.672	1.326	1.481	1.316	25.00	25.20	25.100
o	1.658	1.313	1.469	1.298	25.20	25.40	25.300
o	1.625	1.298	1.431	1.259	25.75	25.90	25.825
o	1.612	1.267	1.410	1.243	26.20	26.40	26.300
o	1.593	1.263	1.386	1.211	26.65	26.80	26.725
o	1.580	1.248	1.367	1.185	27.00	27.10	27.050
o	1.558	1.223	1.345	1.162	27.55	27.60	27.575

t<sub>1</sub> - temperatura na početku mjerenja

t<sub>2</sub> - temperatura na kraju mjerenja

$$t = (t_1 + t_2)/2$$

Eksperimentalni rezultati mjerenja napona potrebnih za određivanje drugog stepena pojačanja

položaj sonde	broj obrt. vent.	brzina jednol. struje	naponi na drugom st. poj. $E_A(V)$				naponi na vrhu mosta $E(V)$			
			senz. br.				senz. br.			
$\varphi$	$\theta$	$U (m/s)$	1	2	3	4	1	2	3	4
o	o	1.2192	0.939	0.660	0.754	0.587	-0.895	-0.682	-0.812	-0.703
o	o	1.4783	1.096	0.741	0.860	0.700	-0.913	-0.691	-0.822	-0.719
o	o	1.7587	1.195	0.874	0.973	0.800	-0.921	-0.702	-0.833	-0.727
o	o	2.0422	1.321	0.963	1.082	0.875	-0.924	-0.713	-0.844	-0.732
o	o	2.5908	1.497	1.109	1.260	1.030	-0.950	-0.724	-0.861	-0.748
o	o		1.627	1.208	1.391	1.138	-0.962	-0.734	-0.875	-0.759
o	o	3.4290	1.721	1.336	1.506	1.205	-0.971	-0.744	-0.885	-0.765

Primjenom metode najmanjeg kvadratnog odstupanja dobijene su sledeće vrijednoszi za koeficijente pojačanja  $K_{1i}$  i  $K_{2i}$

	senz br.			
	1	2	3	4
$K_1$	-8.4149	-6.7679	-7.5317	-6.6393
$K_2$	-10.4339	-10.8750	-10.2070	-10.2475

$$E_{Ai} = K_{1i} + K_{2i}E_i$$



Eksperimentalni rezultati mjerenja napona potrebnih za određivanje konstanti  $A_i$  i  $n_i$  u zakonu hlađenja

broj obr. vent.	brzina jednol. struje	naponi na drugom st. poj. $E_A$				naponi preračunati na vrh mosta poslije temp. korekcije $E$ (V)			
		senz. br.				senz. br.			
n	U(m/s)	1	2	3	4	1	2	3	4
100	1.2192	0.975	0.768	0.839	0.715	-0.8997	-0.6927	-0.8198	-0.7173
120	1.4783	1.100	0.867	0.960	0.807	-0.9129	-0.7029	-0.8330	-0.7279
140	1.7587	1.229	0.967	1.064	0.897	-0.9265	-0.7133	-0.8447	-0.7385
160	2.0422	1.339	1.050	1.158	0.980	-0.9383	-0.7220	-0.8553	-0.7483
180	2.3165	1.428	1.113	1.246	1.058	-0.9475	-0.7285	-0.8647	-0.7567
200	2.5908	1.514	1.172	1.323	1.124	-0.9564	-0.7344	-0.8729	-0.7640
220	2.8651	1.597	1.231	1.392	1.183	-0.9653	-0.7407	-0.8808	-0.7710
240	3.1486	1.662	1.282	1.450	1.230	-0.9727	-0.7465	-0.8878	-0.7772
260	3.4290	1.745	1.341	1.518	1.283	-0.9820	-0.7531	-0.8960	-0.7841
280	3.7186	1.811	1.388	1.517	1.337	-0.9895	-0.7585	-0.9031	-0.7910

napomena:

$\varphi = 0$ , za sve mjerne pozicije.

$$E_i = (E_{Ai} + C_{2i}(t_R - t_i) - K_{1i})/K_{2i}; t_R = 27^\circ\text{C}$$

Eksperimentalni rezultati mjerenja napona potrebnih za određivanje efektivnih  
uglova brzine i vrtloga

položaj sonde	naponi na drugom st. poj. $E_A$				naponi preračunati na vrh mosta poslije temp. korekcije E (V)			
	senz. br.				senz br.			
$\varphi$	1	2	3	4	1	2	3	4
-15 0	1.691	1.421	1.478	1.070	-0.9614	-0.7465	-0.8746	-0.7463
15 0	1.670	1.133	1.468	1.392	-0.9602	-0.7208	-0.8745	-0.7753
-10 0	1.644	1.375	1.437	1.141	-0.9592	-0.7443	-0.8731	-0.7527
10 0	1.630	1.171	1.429	1.340	-0.9585	-0.7262	-0.8731	-0.7731
-5 0	1.616	1.322	1.408	1.177	-0.9588	-0.7415	-0.8729	-0.7592
5 0	1.605	1.220	1.399	1.273	-0.9583	-0.7327	-0.8726	-0.7694
0 0	1.5766	1.240	1.375	1.192	-0.9576	-0.7364	-0.8726	-0.7642
0 -15	1.371	1.274	1.527	1.227	-0.9372	-0.7388	-0.8867	-0.7667
0 15	1.733	1.270	1.188	1.209	-0.9723	-0.7389	-0.8540	-0.7656
0 -10	1.442	1.250	1.464	1.195	-0.9454	-0.7379	-0.8822	-0.7655
0 10	1.679	1.248	1.240	1.178	-0.9688	-0.7384	-0.8610	-0.7648
0 -5	1.512	1.233	1.407	1.173	-0.9534	-0.7376	-0.8781	-0.7651
0 5	1.625	1.232	1.299	1.163	-0.9646	-0.7387	-0.8679	-0.7646

Stvarne komponente brzina i vrtloga pri različitim položajima sonde

$\varphi$	$\theta$	U(m/s)	v(m/s)	w(m/s)	$\omega_x(s^{-1})$
-15	0	2.5025	-0.6705	0.0	0.0
15	0	2.5025	0.6705	0.0	0.0
-10	0	2.5514	-0.4499	0.0	0.0
10	0	2.5514	0.4499	0.0	0.0
-5	0	2.5809	-0.2258	0.0	0.0
5	0	2.5809	0.2258	0.0	0.0
0	0	2.5908	0.0	0.0	0.0
0	-15	2.5025	0.0	-0.6705	0.0
0	15	2.5025	0.0	0.6705	0.0
0	-10	2.5514	0.0	-0.4499	0.0
0	10	2.5514	0.0	0.4499	0.0
0	-5	2.5809	0.0	-0.2258	0.0
0	5	2.5809	0.0	0.2258	0.0

Komponente brzine i vrtloga određene eksperimentalnim putem uz upotrebu optimalne vrijednosti za n

$\varphi$	$\theta$	$U_v$ m/s	$U_h$ m/s	$v$ m/s	$w$ m/s	$\omega$ $s^{-1}$	$\omega_k$ $s^{-1}$	$U_{hk}$ m/s	$U_{vk}$ m/s
-15	0	2.4847	2.5237	-0.6610	0.0323	70.9	318.8	2.6600	2.4847
15	0	2.4837	2.5035	0.6581	0.0107	35.9	283.6	2.6398	2.4837
-10	0	2.5354	2.5322	-0.4672	0.0209	-5.8	119.1	2.6010	2.5354
10	0	2.5351	2.5176	0.4789	0.0073	-31.7	100.2	2.5903	2.5351
-5	0	2.5829	2.5724	-0.2470	0.0173	-19.2	15.7	2.5915	2.5829
5	0	2.5865	2.5626	0.2275	0.0013	-43.2	-13.7	2.5789	2.5865
0	0	2.5635	2.5683	0.0065	0.0004	8.7	8.8	2.5683	2.5635
0	-15	2.5177	2.5327	0.0015	-0.6767	27.1	-232.0	2.5327	2.6600
0	15	2.5055	2.5222	-0.0270	0.6596	30.2	-218.0	2.5222	2.6420
0	-10	2.5604	2.5583	-0.0028	-0.4337	-3.6	-110.4	2.5583	2.6190
0	10	2.5512	2.5639	-0.0320	0.4572	23.1	-95.9	2.5639	2.6160
0	-5	2.5932	2.5990	-0.0042	-0.1975	10.6	-11.4	2.5990	2.6050
0	5	2.5829	2.6013	-0.0214	0.2357	33.4	1.0	2.6013	2.6000

$U_h, U_v$  - komponenta brzine u pravcu x - ose određena pomoću senzora br.1 i 3 odnosno br.2 i 4.  
 $U_{hk}, U_{vk}$  - komponenta brzine u pravcu x - ose određena pomoću senzora br.1 i 3 odnosno br.2 i 4 pri zanemarivanju transvezalnih komponenta brzine.  
 $\omega_k$  - komponenta vrtloga sračunata pri zanemarivanju transvezalnih komponenta brzine.

Komponente brzine i vrtloga određene eksperimentalnim putem sa koeficijentom  $n = 0.5$

$\varphi$	$\theta$	$U_v$		$U_h$		$v$		$w$		$\omega$
		m/s		m/s		m/s		m/s		
-15	0	2.4809	2.5230	-0.6676	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	77.0	
15	0	2.4830	2.5081	0.6533	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	46.3	
-10	0	2.5344	2.5330	-0.4726	0.0191	0.0191	0.0191	0.0191	-2.4	
10	0	2.5384	2.5232	0.4696	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	-28.0	
-5	0	2.5839	2.5736	-0.2524	0.0156	0.0156	0.0156	0.0156	-18.9	
5	0	2.5892	2.5659	0.2199	0.0122	0.0122	0.0122	0.0122	-42.6	
0	0	2.5665	2.5705	-0.0002	-0.0013	-0.0013	-0.0013	-0.0013	7.3	
0	-15	2.5198	2.5283	-0.0048	-0.6785	-0.6785	-0.6785	-0.6785	15.8	
0	15	2.5087	2.5194	-0.0042	0.6596	0.6596	0.6596	0.6596	19.9	
0	-10	2.5627	2.5576	-0.0093	-0.4350	-0.4350	-0.4350	-0.4350	-9.3	
0	10	2.5546	2.5636	-0.0390	0.4555	0.4555	0.4555	0.4555	16.6	
0	-5	2.5954	2.5998	-0.010	-0.1985	-0.1985	-0.1985	-0.1985	8.2	
0	5	2.5859	2.6020	-0.027	0.2335	0.2335	0.2335	0.2335	30.2	

$U_h, U_v$  - komponenta brzine u pravcu  $x$  - ose određena pomoću senzora br.1 i 3 odnosno br.2 i 4.

sen.	$B_i$	$\alpha_i$
1	0.2319	37.25
2	0.1306	37.90
3	0.1941	37.48
4	0.1518	38.20

DODATAK br.2

- Kalibrisanje sonde

Naponi potrebni za odredjivanje temp. korekc.  
i odgovarajuće temperature

sen.1	sen.2	t
1.007	1.000	24.150
1.006	1.000	24.200
1.005	1.000	24.250
1.004	1.000	24.300
1.003	1.000	24.350
1.002	1.000	24.400
1.001	1.000	24.450
1.000	1.000	24.500
0.999	1.000	24.550
0.998	1.000	24.600
0.997	1.000	24.650
0.996	1.000	24.700
0.995	1.000	24.750
0.994	1.000	24.800
0.993	1.000	24.850
0.992	1.000	24.900
0.991	1.000	24.950
0.990	1.000	25.000

Naponi na drugom stepenu poj. i vrhu mosta  
potrebni za odredjivanje koefic. pojačivača

sen.1	sen.1	sen.2	sen.2
0.116	-0.736	0.116	-0.453
0.115	-0.737	0.115	-0.471
0.114	-0.737	0.114	-0.482
0.113	-0.736	0.113	-0.483
0.112	-0.735	0.112	-0.484
0.111	-0.734	0.111	-0.485
0.110	-0.733	0.110	-0.486
0.109	-0.732	0.109	-0.487
0.108	-0.731	0.108	-0.488
0.107	-0.730	0.107	-0.489
0.106	-0.729	0.106	-0.490
0.105	-0.728	0.105	-0.491
0.104	-0.727	0.104	-0.492
0.103	-0.726	0.103	-0.493
0.102	-0.725	0.102	-0.494
0.101	-0.724	0.101	-0.495
0.100	-0.723	0.100	-0.496

Naponi potrebni za odredjivanje koeficijenata  
 $A_i$  i  $B_i$  u zakonu hladjenja

U (m/s)	sen.1	sen.2	t
0.553	0.116	0.116	24.750
0.554	0.115	0.115	24.800
0.555	0.114	0.114	24.850
0.556	0.113	0.113	24.900
0.557	0.112	0.112	24.950
0.558	0.111	0.111	25.000
0.559	0.110	0.110	25.050
0.560	0.109	0.109	25.100
0.561	0.108	0.108	25.150
0.562	0.107	0.107	25.200
0.563	0.106	0.106	25.250
0.564	0.105	0.105	25.300
0.565	0.104	0.104	25.350
0.566	0.103	0.103	25.400
0.567	0.102	0.102	25.450
0.568	0.101	0.101	25.500
0.569	0.100	0.100	25.550



Referentna temperatura

$$t_R = 27 \text{ C}$$

Naponi potrebni za odredjivanje keof.  
 $A_i$  i  $B_i$  poslije temp. korekcije prer.  
 na vrh mosta

sen.1	senz.2
-0.77451	-0.65142
-0.77351	-0.66705
-0.76521	-0.67021
-0.76363	-0.66761
-0.76363	-0.70272
-0.76363	-0.71111
-0.76363	-0.71164
-0.76363	-0.71163
-0.76363	-0.71163
-0.76363	-0.74534
-0.76363	-0.75211

Koeficijenti temperaturske korekcije

	$C_1$	$C_2$
sen.1	0.00438	-0.05494
sen.2	0.01775	-0.06754

Koeficijenti pojačivača

	$K_1$	$K_2$
sen.1	-7.36454	-17.02795
sen.2	-6.76625	-16.55555

Koeficijenti zakona hlađenja

	$A_1$	$B_1$
sen.1	.45335	.06943
sen.2	.71132	.13029



- Odredjivanje gradijenta  $\partial U / \partial y$

$E_{m1}$	$E_{m2}$	RMSE	$DE_1$	$DE_2$	t
.429	.308	.158	.100	-.100	25.775
.465	.363	.155	.100	-.100	25.925
.525	.444	.155	.100	-.100	26.100
.632	.587	.131	.100	-.100	26.275
.630	.590	.129	.100	-.100	26.450
.694	.661	.102	.095	-.095	26.625
.710	.680	.088	.060	-.060	26.750
.704	.675	.081	.050	-.050	26.875
.720	.692	.078	.050	-.050	27.025
.723	.693	.073	.040	-.040	27.200
.760	.712	.065	.030	-.030	27.350
.787	.752	.058	.025	-.025	27.475
.873	.834	.044	.025	-.025	27.625
.946	.900	.025	.025	-.025	27.750

Trenutni naponi, trenutni naponi poslije temp. korekc.  
i trenutni naponi preračunati na vrh mosta

sen.1	sen.2	sen.1	sen.2	sen.1	sen.2
.52900	.20800	.46170	.12591	-.78044	-.64751
.56500	.26300	.50594	.19096	-.78485	-.65348
.62500	.34400	.57555	.28369	-.79180	-.66226
.73200	.48700	.69217	.43842	-.80343	-.67692
.73000	.49000	.69978	.45314	-.80412	-.67831
.76700	.56500	.76840	.54087	-.81103	-.68662
.77000	.62000	.75626	.60325	-.80982	-.69253
.75400	.62500	.74713	.61662	-.80891	-.69380
.77000	.64200	.77137	.64368	-.81132	-.69636
.76300	.65300	.77399	.66640	-.81158	-.69852
.77000	.68200	.76923	.70545	-.81310	-.70222
.81200	.72700	.85810	.75883	-.83179	-.70727
.87300	.80900	.93234	.85088	-.86273	-.71599
.97100	.87500	1.01220	.92526	-.83534	-.72304

Srednji naponi, srednji naponi poslije temp. korekc.  
i srednji naponi preračunati na vrh mosta

sen.1	sen.2	sen.1	sen.2	sen.1	sen.2
.42900	.30800	.36170	.22591	-.77047	-.65679
.46500	.36300	.40594	.29096	-.77488	-.66295
.52500	.44400	.47555	.38369	-.78182	-.67173
.63200	.58700	.59217	.53842	-.79345	-.68639
.63000	.59000	.59978	.55314	-.79421	-.68779
.69400	.66100	.67340	.63587	-.80155	-.69562
.71000	.68000	.69627	.66325	-.80383	-.69822
.70400	.67500	.69713	.66662	-.80392	-.69854
.72000	.69200	.72137	.69368	-.80634	-.70110
.72300	.69300	.73399	.70640	-.80760	-.70231
.76000	.71200	.75923	.73545	-.81011	-.70536
.78700	.75200	.81510	.75583	-.81544	-.70964
.87300	.83400	.90734	.87588	-.85468	-.71836
.94600	.90000	.98720	.95026	-.83285	-.72541

$DE_1$ ,  $DE_2$  - fluktuacije koje odgovaraju maksimalnoj razlici napona.

# Rezultati mjerenja brzina sa gornjim senzorom (sen.1)

y	y <sup>+</sup>	U <sub>mn</sub>	U <sub>mn</sub> <sup>+</sup>	U <sub>m</sub>	U <sub>m</sub> <sup>+</sup>	DU <sub>m</sub>	U <sub>tr</sub>	RMS
.UJ197	12.57755	.92577	9.26223	.97117	5.50201	.02335	1.10753	.24780
.UJ222	14.51212	1.00274	10.00069	1.02556	10.20953	.02281	1.19503	.26201
.UJ249	15.94609	1.13455	11.38310	1.15791	11.61740	.02335	1.34044	.28971
.UJ349	22.68695	1.37657	13.81131	1.39391	13.56520	.01733	1.60595	.28594
.UJ451	29.02322	1.39332	13.97933	1.41017	14.14840	.01685	1.62426	.28554
.UJ451	45.50290	1.50132	15.66494	1.57211	15.77318	.01079	1.79478	.24375
.UJ457	61.71457	1.61579	16.21139	1.62388	16.29255	.00809	1.76391	.21554
.UJ340	86.23308	1.61708	16.23233	1.62473	16.01111	.00666	1.74037	.19901
.UJ721	110.75159	1.67685	16.82401	1.68326	16.58822	.00641	1.90241	.19624
.UJ229	145.44294	1.70803	17.13681	1.71366	17.19334	.01563	1.80912	.18571
.UJ245	208.32564	1.77142	17.77266	1.77592	17.71804	.00450	1.84954	.16954
.UJ277	359.59103	1.91127	19.17598	1.91492	19.21255	.00365	1.97030	.15757
.UJ357	666.50652	2.17112	21.78313	2.17328	21.80450	.00216	2.26335	.12892
.UJ437	993.41799	2.40684	24.14808	2.40755	24.15525	.00071	2.48360	.07757

# Rezultati mjerenja brzina sa donjim senzorom (sen.2)

y	y <sup>+</sup>	U <sub>mn</sub>	U <sub>mn</sub> <sup>+</sup>	U <sub>m</sub>	U <sub>m</sub> <sup>+</sup>	DU <sub>m</sub>	U <sub>tr</sub>	RMS	∂U/∂y
.UU125	8.04413	.76594	7.68475	.76899	7.91602	.02305	.61755	.24780	600.5
.UU150	9.67870	.87234	8.75229	.89508	8.93039	.02273	.71201	.26201	670.8
.UU177	11.51327	1.03790	10.41339	1.06143	10.64945	.01777	.86005	.28971	670.2
.UU277	17.85154	1.35195	13.56423	1.36971	13.74249	.01732	1.14348	.28594	620.8
.UU379	24.58980	1.38438	13.89661	1.40170	14.06338	.01115	1.17391	.28554	609.1
.UU653	40.75548	1.57502	15.80233	1.58616	15.91416	.00837	1.35732	.24375	609.1
.UU807	57.08115	1.64131	16.46749	1.64969	16.55151	.00710	1.49011	.19901	609.1
.UJ288	81.59966	1.64960	16.55067	1.65671	16.62191	.00665	1.52937	.19624	609.1
.UJ649	105.11517	1.71690	17.22587	1.72355	17.29258	.00605	1.59325	.19624	609.1
.UJ157	158.80952	1.74912	17.54909	1.75497	17.60777	.00565	1.64006	.18571	609.1
.UJ173	204.19222	1.82399	18.30028	1.82867	18.34727	.00468	1.74670	.16954	609.1
.UJ205	354.95767	1.95283	19.59291	1.95602	19.63094	.00379	1.88559	.15757	609.1
.UJ285	661.67109	2.41201	22.19941	2.41466	22.22197	.00265	2.14014	.12892	609.1
.UJ385	988.78457	2.43687	24.44943	2.44376	24.45659	.00074	2.36004	.07757	609.1

U<sub>tr</sub><sup>+</sup> - trenutna ekstremna brzina.

U<sub>mn</sub><sup>+</sup> - srednje brzine bez korekcije DU<sub>m</sub> (drugi član u izrazu (4.6))

- Odredjivanje gradijenta  $\partial U / \partial z$

$E_{m1}$	$E_{m2}$	RMSE	$DE_1$	$DE_2$	t
.2200	.194	.153	.035	-.025	28.075
.2460	.225	.155	.035	-.025	28.225
.3200	.222	.152	.110	-.110	28.325
.4010	.366	.145	.110	-.110	28.475
.4320	.400	.135	.110	-.110	28.625
.540	.496	.130	.030	-.030	28.775
.604	.555	.086	.030	-.030	28.925
.651	.600	.073	.040	-.040	29.075
.727	.670	.066	.035	-.035	29.225
.830	.766	.035	.035	-.035	29.350
.854	.781	.009	.025	-.025	29.500

Trenutni naponi, trenutni naponi poslije temp. korekc.  
i trenutni naponi preračunati na vrh mosta

sen.1	sen.2	sen.1	sen.2	sen.1	sen.2
.22000	.17400	.27906	.26604	-.76223	-.66059
.24600	.22500	.31193	.30541	-.76551	-.66432
.32000	.22200	.39280	.38079	-.77357	-.67146
.40100	.36600	.48214	.46684	-.78247	-.67961
.43200	.40000	.52728	.50889	-.78693	-.68359
.54000	.49600	.61752	.61494	-.79799	-.69364
.60400	.55500	.70976	.68399	-.80518	-.70019
.65100	.60000	.76500	.73905	-.81060	-.70540
.72700	.67000	.84624	.81910	-.81039	-.71298
.83000	.76600	.95911	.92347	-.83004	-.72287
.85400	.78100	.99135	.94853	-.83326	-.72524

Srednji naponi, srednji naponi poslije temp. korekc.  
i srednji naponi preračunati na vrh mosta

sen.1	sen.2	sen.1	sen.2	sen.1	sen.2
.31500	.09900	.37406	.17104	-.77170	-.65159
.34100	.13000	.40693	.21741	-.77498	-.65532
.42000	.19200	.49280	.26079	-.78354	-.66199
.50100	.26800	.58204	.36684	-.79244	-.67014
.53200	.30000	.62728	.40889	-.79695	-.67412
.61000	.42600	.70752	.54494	-.80496	-.68701
.65400	.52500	.75976	.63399	-.81017	-.69545
.68100	.58000	.80500	.69905	-.81468	-.70161
.75200	.64500	.87424	.79410	-.82158	-.71261
.85500	.74100	.98411	.89847	-.83254	-.72050
.87900	.75600	1.01635	.92353	-.83575	-.72288

$DE_1$ ,  $DE_2$  - fluktuacije koje odgovaraju maksimalnoj razlici napona.

RMSE - srednja kvadratna vrijednost fluktuacije napona

Rezultati mjerenja brzina sa lijevim senzorom (senz.1)

y	y <sup>+</sup>	U <sub>mn</sub>	U <sub>mn</sub> <sup>+</sup>	U <sub>m</sub>	U <sub>m</sub> <sup>+</sup>	DU <sub>m</sub>	U <sub>tr</sub>	RMS
00161	10.36084	7.5603	7.53634	8.0731	8.09286	0.2128	0.94547	0.25146
00166	11.39541	8.2031	8.42088	8.6140	8.64253	0.2209	1.00455	0.26626
00213	13.62998	9.7890	7.82138	1.00074	10.04051	0.2184	1.11686	0.28328
00341	22.07624	1.14730	11.51102	1.16695	11.70809	0.1964	1.35477	0.28905
00415	26.70651	1.23853	12.62676	1.25607	12.60225	0.1749	1.65477	0.28210
00603	43.05219	1.47805	14.82647	1.48830	14.93231	0.1725	1.64299	0.23452
00923	59.39786	1.64844	16.53899	1.65620	16.61684	0.0776	1.77277	0.21452
01625	108.43483	1.8611	17.02021	1.79180	17.97729	0.0569	1.88985	0.19097
03209	206.50893	2.00867	20.15277	2.01284	20.19504	0.0421	2.07704	0.17338
06311	419.50269	2.32227	23.29063	2.32366	23.31356	0.0139	2.39743	0.10637
12361	827.64453	2.41947	24.27479	2.41956	24.27572	0.0009	2.49647	0.02789

Rezultati mjerenja brzina sa desnim senzorom (senz.2)

y	y <sup>+</sup>	U <sub>mn</sub>	U <sub>mn</sub> <sup>+</sup>	U <sub>m</sub>	U <sub>m</sub> <sup>+</sup>	DU <sub>m</sub>	U <sub>tr</sub>	RMS	∂U/∂z
00161	10.36094	8.3063	8.33381	8.5258	8.55399	0.0000	0.68226	0.25146	2.65
00166	11.39541	8.9705	9.00023	9.1991	9.22955	0.2195	0.74174	0.26626	3.65
00212	13.62998	1.03247	10.35886	1.05107	10.58562	0.2286	0.85517	0.28328	4.33
00341	22.07624	1.20677	12.62644	1.22102	12.55062	0.2260	0.85517	0.28905	4.63
00415	26.70651	1.28327	12.92538	1.30640	13.0721	0.2035	1.08578	0.28219	5.12
00603	43.05219	1.52542	15.30471	1.53606	15.41141	0.1812	1.36626	0.23452	5.85
00923	59.39786	1.69263	16.98239	1.70069	17.06331	0.1664	1.57053	0.21452	6.20
01625	108.43488	1.83338	18.39447	1.83929	18.50531	0.0806	1.73045	0.19097	6.71
03209	206.50897	2.05007	20.56857	2.05445	20.61254	0.0591	1.98085	0.17338	7.22
06311	419.50269	2.35461	23.62410	2.35606	23.63861	0.0438	2.27936	0.10637	8.40
12361	827.64453	2.43150	24.39552	2.43160	24.39649	0.0145	2.35477	0.02789	196

U<sub>tr</sub> - trenutna ekstremna brzina.

U<sub>mn</sub>, U<sub>mn</sub><sup>+</sup> - srednje brzine bez korekcije DU<sub>m</sub> (drugi član u izrazu (4.6))

Eksperimentalne vrijednosti napona potrebne  
maksimalne vrijednosti vrtloga

pol. sen. N	srednji napon $E_{mi}$				$E_{max}$
	senzor br.				
	1	2	3	4	
0	0.522	0.468	0.268	0.401	190
10	0.553	0.496	0.302	0.431	200
20	0.608	0.553	0.377	0.497	200
40	0.621	0.569	0.404	0.517	190
60	0.635	0.586	0.426	0.537	190
100	0.674	0.621	0.463	0.574	190
200	0.739	0.683	0.525	0.640	175
300	0.775	0.715	0.552	0.673	140
450	0.810	0.748	0.579	0.699	140
600	0.831	0.771	0.601	0.722	120
800	0.841	0.777	0.606	0.726	100
1200	0.882	0.818	0.640	0.764	100
2000	0.934	0.864	0.677	0.809	100
4000	1.021	0.941	0.737	0.879	50
6000	1.077	0.986	0.765	0.918	30

$$y = 25.4N/1000000 + 0.00160 \text{ (m)}$$



za procjenu

$E_{\text{eks}}$	t
250	25.950
250	26.225
260	26.450
250	26.600
280	26.775
280	26.975
250	27.125
220	27.275
220	27.425
200	27.500
150	27.625
150	27.725
120	27.850
80	28.250
30	28.125

DODATAK br.3

- Analiza slučaja kada je  $v \approx w \approx 0$

Koeficijenti kalibracije

sen. br.	A <sub>i</sub>	B <sub>i</sub>	C <sub>2i</sub>	K <sub>1i</sub>	K <sub>2i</sub>
4	.40788	.17681	-.04671	-7.70025	-10.95531
1	.35604	.17381	-.04380	-6.38554	-9.70162
2	.25949	.12394	-.06840	-6.07165	-10.62198
3	.30330	.13647	-.05128	-6.36171	-10.50214

Trenutne fluktuacije napona

sen.4	sen.1	sen.2	sen.3
-.0475	.0475	-.0475	.0475
-.0500	.0500	-.0500	.0500
-.0500	.0500	-.0500	.0500
-.0475	.0475	-.0475	.0475
-.0475	.0475	-.0475	.0475
-.0475	.0475	-.0475	.0475
-.0438	.0438	-.0438	.0438
-.0350	.0350	-.0350	.0350
-.0350	.0350	-.0350	.0350
-.0300	.0300	-.0300	.0300
-.0250	.0250	-.0250	.0250
-.0250	.0250	-.0250	.0250
-.0250	.0250	-.0250	.0250
-.0125	.0125	-.0125	.0125
-.0070	.0070	-.0070	.0070

Trenutni naponi prije temperaturske korekcije

sen.4	sen.1	sen.2	sen.3
.4745	.5155	.2205	.4485
.5030	.5460	.2520	.4810
.5580	.6030	.3270	.5470
.5735	.6435	.3565	.5645
.5875	.6335	.3785	.5845
.6265	.6685	.4155	.6215
.6953	.7267	.4813	.6837
.7400	.7500	.5170	.7080
.7750	.7830	.5440	.7360
.8010	.8010	.5710	.7520
.8160	.8020	.5810	.7510
.8570	.8430	.6150	.7890
.9090	.8890	.6520	.8340
1.0085	.9535	.7245	.8915
1.0700	.9930	.7580	.9250

Srednji naponi poslije temperaturske korekcije preračunati  
na vrh mosta

sen.4	sen.1	sen.2	sen.3
-.7460	-.7017	-.5901	-.6388
-.7501	-.7058	-.5951	-.6430
-.7560	-.7127	-.6036	-.6504
-.7579	-.7178	-.6071	-.6530
-.7599	-.7176	-.6103	-.6558
-.7643	-.7221	-.6150	-.6603
-.7709	-.7292	-.6218	-.6673
-.7748	-.7331	-.6254	-.6712
-.7786	-.7372	-.6289	-.6744
-.7811	-.7401	-.6317	-.6772
-.7823	-.7411	-.6327	-.6779
-.7865	-.7458	-.6365	-.6820
-.7918	-.7511	-.6408	-.6869
-.8014	-.7608	-.6490	-.6956
-.8060	-.7649	-.6509	-.6987
-.5878	-.5363	-.3977	-.4739

Trenutni naponi poslije temperaturske korekcije preračunati  
na vrh mosta

sen.4	sen.1	sen.2	sen.3
-.7417	-.7066	-.5856	-.6433
-.7455	-.7110	-.5903	-.6478
-.7515	-.7179	-.5989	-.6552
-.7535	-.7227	-.6026	-.6576
-.7555	-.7225	-.6058	-.6603
-.7600	-.7270	-.6106	-.6648
-.7669	-.7337	-.6177	-.6715
-.7716	-.7367	-.6221	-.6745
-.7754	-.7408	-.6256	-.6777
-.7783	-.7432	-.6289	-.6800
-.7800	-.7437	-.6303	-.6803
-.7842	-.7484	-.6342	-.6844
-.7895	-.7537	-.6385	-.6893
-.8003	-.7621	-.6479	-.6967
-.8053	-.7656	-.6502	-.6993
-.5878	-.5363	-.3977	-.4739

Komponente srednjih brzina i srednjeg vrtloga

$U_m$	$v_m$	$w_m$	$U_{mh}$	$U_{mv}$	$\omega_{x,m}$
.8213	-.0188	.1387	.8374	.8053	46.0708
.9075	-.0125	.1299	.9258	.8892	52.5582
1.0620	-.0039	.1010	1.0799	1.0441	51.4405
1.1354	-.0178	.0798	1.1403	1.1305	14.1656
1.1825	.0193	.0633	1.2016	1.1633	55.0204
1.2910	.0284	.0535	1.3130	1.2690	63.2554
1.4646	.0437	.0410	1.4854	1.4439	59.4938
1.5663	.0521	.0408	1.5861	1.5465	56.8107
1.6673	.0493	.0393	1.6901	1.6445	65.5074
1.7467	.0549	.0279	1.7682	1.7252	61.7484
1.7749	.0541	.0300	1.8006	1.7492	73.8339
1.8998	.0575	.0270	1.9226	1.8770	65.4627
2.0530	.0657	.0332	2.0736	2.0323	59.3973
2.3524	.0751	.0380	2.3749	2.3299	64.5923
2.4686	.0694	.0817	2.4870	2.4501	52.9977

Komponente trenutnih brzina i trenutnog maksimalnog vrtloga

$U$	$v$	$w$	$U_h$	$U_v$	$\omega_{x,max}$
.8267	-.0163	.1379	.7557	.8976	-203.7734
.9127	-.0093	.1304	.8347	.9906	-223.9198
1.0664	-.0083	.1043	.9798	1.1529	-248.5395
1.1398	-.0147	.0844	1.0420	1.2377	-281.0499
1.1859	.0244	.0691	1.0998	1.2721	-247.3311
1.2944	.0341	.0604	1.2056	1.3831	-254.8798
1.4677	.0498	.0487	1.3785	1.5568	-256.0506
1.5684	.0573	.0474	1.4968	1.6401	-205.7424
1.6695	.0545	.0463	1.5975	1.7414	-206.6823
1.7484	.0595	.0344	1.6864	1.8104	-178.1203
1.7761	.0579	.0355	1.7315	1.8206	-127.8719
1.9012	.0615	.0329	1.8508	1.9515	-144.5020
2.0544	.0700	.0392	1.9986	2.1103	-160.4032
2.3530	.0774	.0413	2.3340	2.3720	-54.5053
2.4689	.0707	.0834	2.4635	2.4743	-15.5452

$U_{mh}, U_{mv}$  - komponenta brzine u glavnom pravcu strujanja određena pomoću horizontalnih odnosno vertikalnih sen.

$U_h, U_v$  - komponente trenutnih brzina u glavnom pravcu strujanja koje odgovaraju maksimalnoj vrijednosti vrtloga  $\omega_{x,max}$ , određene pomoću hor. odnosno vert. senz.

$$U_m = (U_{mh} + U_{mv})/2$$

$$U = (U_h + U_v)/2$$

Napomena: srednja vrijednost komponente  $w_m$  u blizini zida je dobijena različita od nule iako je stvarna srednja vrijednost jednaka nuli. Ova greška nastaje usled uticaja srednjeg gradijenta  $\partial U_m / \partial y$ . Uzimanjem ovog uticaja u obzir može se dobijena greška korigovati.

DODATAK br.4

- Kalibracija sonde sa tri senzora

Imajući u vidu jedinstvenost primijenjenog postupka u dodatku je dat kompletan program za kalibraciju sa potrebnim ulaznim podacima i dobijenim rezultatima. S obzirom da na računaru ne postoji mogućnost upotrebe malih slova pojedine veličine su označene drugačije nego što je to uradjeno u samom radu. Imajući to u vidu, kao i činjenicu da je u programu uvedeno niz novih veličina, priložena je posebna lista oznaka koje se odnose na ovaj dodatak.

AKOR(I) - koeficijenti blokiranja za pozitivne transvezalne komponente.

AKON(I) - koeficijenti blokiranja za negativne transvezalne komponente.

ETEM(I,J) - naponi potrebni za odredjivanje temperaturske korekcije.

ET(I,J) - naponi na vrhu mosta potrebni za odredjivanje koeficijenata pojačivača.

EA(I,J) - naponi na drugom stepenu pojačanja potrebni za odredjivanje koeficijenata pojačivača.

ERP(I,J) - naponi koji odgovaraju poznatim brzinama strujanja jednoli-  
ke struje, potrebni za odredjivanje koeficijenata  $A_i$  u zako-  
nu hladjenja.

EP(I,J), EY(I,J) - naponi dobijeni pri promjeni ugla nagiba sonde  $\varphi$   
u vertikalnoj i  $\theta$  u horizontalnoj ravni.

TR - referentna temperatura.

ALFA(I) - stvarni uglovi nagiba senzora.

UP(I), UY(I), VP(I), VY(I), WP(I), WY(I) - stvarne komponente brzine  
koje odgovaraju različitim položajima sonde pri promjeni  
uglova  $\varphi$  i  $\theta$ .

- UINF(I) - promenljiva brzine strujanja jednolike struje (promjena se ostvaruje mijenjanjem broja obrtaja RPM ventilatora).
- R32, R12, R13, R1G - otpori senzora br.3 i br.2, br.1 i br.2 itd.  
potrebni za odredjivanje "cross-talk" korekcije.
- AKT - koeficijent tangentne komponente hladjenja.
- C1(I), C2(I) - koeficijenti temperaturske korekcije.
- AK1(I), AK2(I) - koeficijenti pojačivača (amplifajera).
- EPK(I,J), EYK(I,J), - naponi pri promjeni uglova  $\varphi$  i  $\theta$  poslije temp. korekcije.
- ERPK(I,J) - naponi pri promjeni brzine jednolike struje poslije temp. korekcije.
- EPKK(I,J), EYKK(I,J) - naponi pri promjeni uglova  $\varphi$  i  $\theta$  preračunati na vrh mosta.
- ERPCK(I,J) - naponi pri promjeni brzine jednolike struje preračunati na vrh mosta.
- EPSS(I,J), EYSS(I,J), ERPSS(I,J) - naponi iz predhodne dvije tačke poslije "cross-talk" korekcije.
- ARPM(I), BRPM(I), DRPM(I) - koeficijenti  $A_i$ ,  $B_i$ , i  $D_i$  (prema stvarnom uglu) u zakonu hladjenja.
- AAFK(I) - efektivni uglovi.
- BAFK(I) - koeficijenti  $B_i$  u zakonu hladjenja koji odgovaraju efektivnim uglovima.
- UINFR(I,J) - eksperimentalne vrijednosti brzina jednolike struje, odredjene korišćenjem stvarnih uglova nagiba senzora i odgovarajućih koeficijenata  $B_i$ .
- UINFA(I,J) - eksperimentalne vrijednosti brzina jednolike struje, odredjene korišćenjem efektivnih uglova nagiba senzora i odgovarajućih koeficijenata  $B_i$ .
- U1, V1, W1 - prve aproksimacije komponenata brzine U, v i w.



UKSAF(I), WKAF(I), VKAF(I) - prve aproksimacije komponentata brzine  
U, v i w pri promjeni ugla  $\varphi$  .

WPAF(I), UPSAF(I), VPAF(I) - eksperimentalne vrijednosti komponentata  
brzine U, v i w pri promjeni ugla  $\varphi$  .

UKSAY(I), VKAY(I), WKAY(I) - prve aproksimacije komponentata brzine  
U, v i w pri promjeni ugla  $\theta$  .

UYSAF(I), VYAF(I), WYAF(I) - eksperimentalni rezultati mjerenja kompo-  
nentata brzine pri promjeni ugla  $\theta$  .

UKSRP(I), WKRP(I), VKRP(I) - prve aproksimacije komponentata brzine  
jednolike struje.

UKPAF(I), VRPA(I), WRPA(I) - eksperimentalne vrijednosti komponentata  
brzine jednolike struje.

RPM - broj obrtaja ventilatora (o/min).

napomena:

- svi rezultati su dati u odgovarajućem redosledu počev od rezultata koji se odnose na prvi senzor itd.

2	0000	R	003110	K3	0000	R	00	073	R32	0000	R	003100	SA1
3	0000	R	003143	SF1	0000	R	00	144	SF2	0000	R	003145	SF2
4	0000	R	003150	SS3	0000	R	00	107	SUM1	0000	R	003110	SUM2
5	0000	R	003123	SUM5	0000	R	001	100	T	0000	R	002301	TP
6	0000	R	002313	TY	0000	R	00	340	UINF	0000	R	002552	UINF A
7	0000	R	002502	UKSAY	0000	R	00	135	UKSRP	0000	R	003155	UN
8	0000	R	000301	URPAF	0000	R	00	124	USF	0000	R	002202	UY
9	0000	R	002420	VKAP	0000	R	00	514	VKAY	0000	R	000161	VKRP
10	0000	R	002302	VPAF	0000	R	00	255	VPPA	0000	R	002220	VY
11	0000	R	002374	WKAP	0000	R	00	470	WKAY	0000	R	000205	WKRP
12	0000	R	000231	WRPA	0000	R	00	125	WSF	0000	R	002236	WY

```

DIMENSION AKOR(3),ERT(3,30),UKSRP(20) VKRP(20),WKPP(20),WRPA(20),V
*IPA(20),UKPAF(20)
DIMENSION ALFA(3),EPSS(3,20),EYSS(3,20),ERPSS(3,20),P(10),Q(10)
DIMENSION UINF(4,20)
DIMENSION ETEM(4,20),T(20),ET(4,10),E(4,10),ERP(4,15),UINF(15),EP
*(4,15),EY(4,10),C1(4),C2(4),AK1(4),AK(4),EPK(4,10),EYK(4,10),ERP
*(4,15),EPK(4,10),EYK(4,15),ERP(4,15),UP(7),UY(7),VP(7),VY(7)
DIMENSION WP(7),WY(7),APPM(4),DRPM(7) BRPM(7)
DIMENSION TRP(10),IP(10),TY(10)
DIMENSION AKON(3)
DIMENSION AAFK(3),BAFK(3),WPAF(10),UPAF(10),VPAF(10),WKAP(10),UKS
*AP(10),VKAP(10),WYAF(10),UYSAF(10),VYF(10),WKAY(10),UKSAY(10),VKA
*Y(10),PHP(20),UINF(10,20)
READ(5,108) N1,N2,N3,N4
108 FORMAT(4I4)
N5=2*N4
READ(5,104)((ETEM(I,J),I=1,3),T(J),J=1,N1)
READ(5,100)((ET(I,J),I=1,3),J=1,N2)
READ(5,100)((EA(I,J),I=1,3),J=1,N2)
READ(5,104)((ERP(I,J),I=1,3),TRP(J),J=1,N3)
READ(5,104)((EP(I,J),I=1,3),IP(J),J=1,N4)
READ(5,104)((EY(I,J),I=1,3),TY(J),J=1,N4)
100 FORMAT(3F8.4)
104 FORMAT(4F8.4)
READ(5,101) TR,ALFA(1),ALFA(2),ALFA(3),AKT
101 FORMAT(5F7.4)
READ(5,102)(UP(I),VP(I),WP(I),UY(I),VY(I),WY(I),I=1,N4)
102 FORMAT(6F8.4)
READ(5,103)(UINF(I),I=1,N3)
103 FORMAT(9F8.4)
READ(5,111) R32,R12,R13,R16
111 FORMAT(4F8.3)
READ(5,122)(AKON(I),I=1,3)
122 FORMAT(3F8.3)
READ(5,130)(AKOR(I),I=1,3)
130 FORMAT(3F8.3)
WRITE(6,201)
WRITE(6,207)((ETEM(I,J),I=1,3),T(J),J=1,N1)
WRITE(6,202)((ET(I,J),I=1,3),J=1,N2)
WRITE(6,203)((EA(I,J),I=1,3),J=1,N2)
WRITE(6,204)((ERP(I,J),I=1,3),TRP(J),J=1,N3)
WRITE(6,205)((EP(I,J),I=1,3),IP(J),J=1,N4)
WRITE(6,206)((EY(I,J),I=1,3),TY(J),J=1,N4)
WRITE(6,208) TR,ALFA(1),ALFA(2),ALFA(3),AKT
230 FORMAT(3X,5F8.4)
WRITE(6,209)
WRITE(6,212)(UP(I),VP(I),WP(I),UY(I),VY(I),WY(I),I=1,N4)
WRITE(6,210)
WRITE(6,213)(UINF(I),I=1,N3)
207 FORMAT(4F10.5)
201 FORMAT(///,'NAPONI I TEMPERATURE ZA T MP. KOREKCIJU')
202 FORMAT(///,'TPP MOSTA ZA OJFEDJIVANJE KOEFICIJENATA AMPLIFAJERA')
203 FORMAT(///,'POJACANI NAPONI ZA OJFEDJIVANJE KOEFICIJENATA AMPL.')
204 FORMAT(///,'NAPONI DOBIJENI PRI PROMJENI RPM')

```

```

205 FORMAT(///, 'NAPONI DOBIJENI PRI PROMJENI PICHIA'//)
206 FORMAT(///, 'NAPONI DOBIJENI PRI PROMJENI YOWA'//)
208 FORMAT(///, 'KLF. TEMP., UGAO NAGIBA S NIZORA I KOEF. TANGEN. KOMP.
*MLADJENJA'//)
209 FORMAT(///, 'TEORIJSKE BRZINE PRI PROMJENI PICHIA I YOWA'//)
210 FORMAT(///, 'BRZINA U CENTRU TUNELA PRI PROMJENI RPM'//)
TIMESIN(ALFA(1)+ALFA(3))
SA1= SIN(ALFA(1))
SA2= SIN(ALFA(2))
SA3= SIN(ALFA(3))
CO1= COS(ALFA(1))
CO2= COS(ALFA(2))
CO3= COS(ALFA(3))
AKT2=AKT**2
DO 33 I=1,3
P(1)=SQRT(1.+(AKT**2)*(TAN(ALFA(1))**2))
Q(1)=SQRT(1.+(AKT**2)*(COTAN(ALFA(1))**2))
33 CONTINUE
KOEFIKIJENTI TEMPERATURSKE KOREKCIJE 1 I C2
DO 1 I=1,3
SUM1=0.
SUM2=0.
SUM3=0.
SUM4=0.
NN=0
DO 2 J=1,N1
SUM4=SUM4+T(J)
SUM3=SUM3+T(J)**2
SUM2=SUM2+ETEM(1,J)
SUM1=SUM1+ETEM(1,J)*T(J)
NN=NN+1
2 CONTINUE
C1(1)=(SUM2*SUM3-SUM4*SUM1)/(NN*SUM3-SUM4**2)
C2(1)=(NN*SUM1-SUM4*SUM2)/(NN*SUM3-SUM4**2)
1 CONTINUE
KOEFIKIJENTI AMPLIFAJERA K1 I K2
DO 3 I=1,3
SUM1=0.
SUM2=0.
SUM3=0.
SUM4=0.
NN=0
DO 4 J=1,N2
SUM4=SUM4+ET(I,J)
SUM3=SUM3+ET(I,J)**2
SUM2=SUM2+EA(I,J)
SUM1=SUM1+EA(I,J)*ET(I,J)
NN=NN+1
4 CONTINUE
AK1(1)=(SUM2*SUM3-SUM4*SUM1)/(NN*SUM3-SUM4**2)
AK2(1)=(NN*SUM1-SUM4*SUM2)/(NN*SUM3-SUM4**2)
3 CONTINUE
KOREKCIJA PODATAKA
TEMPERATURSKA KOREKCIJA
DO 5 I=1,3
DO 6 J=1,N4
LPK(I,J)=EP(I,J)+C2(1)*(TR-TP(J))
LYK(I,J)=EY(I,J)+C2(1)*(TR-TY(J))
6 CONTINUE
5 CONTINUE
DO 7 I=1,3
DO 8 J=1,N4
ERP(I,J)=EP(I,J)+C2(1)*(TR-TRP(J))
8 CONTINUE
7 CONTINUE
PREKACUN NA TOP MOSTA
DO 9 I=1,3
DO 10 J=1,N4
EPKK(I,J)=(EPK(I,J)-AK1(1))/AK2(1)
LYKK(I,J)=(EYK(I,J)-AK1(1))/AK2(1)
10 CONTINUE
9 CONTINUE
DO 11 I=1,3
DO 12 J=1,N3
ERP(K(I,J)=(ERP(I,J)-AK1(1))/AK2(1)
12 CONTINUE

```

```

11 CONTINUE
  NROS TOR KOREKCIJA
  R1=(R13+R12-R32)/2.
  R2=(F132+R12-F13)/2.
  R3=(R32+R13-F12)/2.
  RG=R16-R1
  DO 51 I=1,3
  DO 52 J=1,N4
    L3P=(LPKK(1,J)/R1+LPKK(2,J)/R2+EPKK(3,J)/R3)/(1./RG+1./R1+1./R2+1.
    * /R3)
    EPSS(1,J)=EPKK(1,J)-L3P
    E3Y=(EYKK(1,J)/R1+EYKK(2,J)/R2+EYKK(3,J)/R3)/(1./RG+1./R1+1./R2+1.
    * /R3)
    EYSS(1,J)=EYKK(1,J)-E3Y
52 CONTINUE
51 CONTINUE
  DO 53 I=1,3
  DO 54 J=1,N3
    E3RP=(ERPKK(1,J)/R1+ERPKK(2,J)/R2+ERP K(3,J)/R3)/(1./RG+1./R1+1./R
    * 2+1./R3)
    ERPSS(1,J)=ERPKK(1,J)-E3RP
54 CONTINUE
53 CONTINUE
  CUREGULIVANJE KING'S LAW KUEFICIJENAT NA OSNOVU RPM
  DO 13 I=1,3
    SUM5=0.
    SUM4=0.
    SUM3=0.
    SUM2=0.
    SUM1=0.
    INN=0
    DO 14 J=1,N3
      SUM3=SUM3+ERPSS(I,J)**2
      SUM5=SUM5+(ERPSS(I,J)**2)*SQRT(UINF(J))
      SUM4=SUM4+UINF(J)
      SUM2=SUM2+SQRT(UINF(J))
    NN=NN+1
14 CONTINUE
  ARPM(I)=(SUM3-SUM2*(SUM5*INN-SUM2*SUM3)/(SUM4*NN-SUM2**2))/NN
  ORPM(I)=(SUM5*INN-SUM2*SUM3)/(SUM4*NN-SUM2**2)
  BRPM(I)=ORPM(I)/(SQRT(COS(ALFA(I)))*(1.+(AKT**2)*(TAN(ALFA(I))**2
  * )**0.25))
13 CONTINUE
  PRORACUN EFEKTIVNIH UGLOVA I ODG. B K EFICIJENATA
  DO 901 I=1,3
    SUM1=0.
    SUM2=0.
    SUM3=0.
    SUM4=0.
    SUM5=0.
    DO 902 J=1,N4
      IF(I-2) 904,905,904
904 USF=UY(J)
      WSF=WY(J)
      ESSF=EYSS(I,J)
      GO TO 906
905 USF=UP(J)
      WSF=WP(J)
      ESSF=EPSS(I,J)
906 SUM1=SUM1+USF**2
      SUM2=SUM2+USF*WSF
      SUM3=SUM3+(ESSF**2-ARPM(I)**2)*USF
      SUM4=SUM4+WSF**2
      SUM5=SUM5+(ESSF**2-ORPM(I)**2)*WSF
902 CONTINUE
  AIMEN=(SUM4*SUM1-SUM2**2)
  AC1=(SUM3*SUM4-SUM2*SUM5)/AIMEN
  AC2=(SUM5*SUM1-SUM2*SUM3)/AIMEN
  AC12=AC2/AC1
  AL=ATAN(AC12)
  AD=SQRT(AC1/COS(AL))
  SUM3=0.
  SUM5=0.
  DO 903 J=1,N4
    IF(I-2) 907,908,907
907 USF=UY(J)

```

```

W SF=„Y(J)
ESSF=LYSS(I,J)
GO TO 909
908 USF=UP(J)
W SF=VP(J)
ESSF=EPSS(I,J)
909 PSUM=SQRT(((ESSF**2-ARPM(I))**4)-AB** *(((USF*SIN(AL)-W SF*COS(AL))
*AK1)**2))
SUM3=SUM3+PSUM*USF
SUM5=SUM5+PSUM*W SF
903 CONTINUE
AIMEN=SUM4*SUM1-SUM2**2
AC1=(SUM3*SUM4-SUM2*SUM5)/AIMEN
AC2=(SUM5*SUM1-SUM2*SUM3)/AIMEN
AC12=AC2/AC1
AAFK(1)=ATAN(AC12)
BAFK(1)=SQRT(AC1/COS(AAFK(1)))
901 CONTINUE
AAFK(3)=-AAFK(3)
SRACUNAVANJE BRZINE U CENTRU TUNELA NA OSNOVU KINGOVIH KOEF. U CIL
JU PROMJERE ISTIH
DO 41 I=1,3
DO 42 J=1,N3
UINF(I,J)=(((ERPSS(I,J)**2-ARPM(I))/ RPM(I))**2)/(P(I)*COS(ALFA(I
*)))
PPP(1)=SQRT(1.+(AK1**2)*(TAN(AAFK(1)) **2))
UINFA(I,J)=(((ERPSS(I,J)**2-ARPM(I))/ AFK(I))**2)/(PPP(I)*COS(AAFK
*(1)))
42 CONTINUE
41 CONTINUE
WRITE(6,211)
211 FORMAT(/,,,' KOEFICIJENTI TEMPERATU SPE KOREKCIJE'/)
WRITE(6,212)(C1(I),I=1,3)
WRITE(6,212)(C2(I),I=1,3)
212 FORMAT(3F10.5)
WRITE(6,213)
213 FORMAT(/,,,' KOEFICIJENTI AMPLIFAJE A'/)
WRITE(6,212)(AK1(I),I=1,3)
WRITE(6,212)(AK2(I),I=1,3)
WRITE(6,214)
214 FORMAT(/,,,' NAPONI POSLIJE TEMPERA UTSKE KOREKCIJE'/)
WRITE(6,100)((EPK(I,J),I=1,3),J=1,N4)
WRITE(6,100)((EYK(I,J),I=1,3),J=1,N4)
WRITE(6,100)((ERP(K(I,J),I=1,3),J=1,N3)
WRITE(6,215)
215 FORMAT(/,,,' NAPONI KORIGOVANI I PR RACUNATI NA TOP MOSTA'/)
WRITE(6,100)((EPKK(I,J),I=1,3),J=1,N4)
WRITE(6,100)((EYKK(I,J),I=1,3),J=1,N4)
WRITE(6,100)((ERP(K(I,J),I=1,3),J=1,N3)
WRITE(6,511)
511 FORMAT(/,,,' NAPONI KORIGOVANI ZA K OS TOK'/)
WRITE(6,348)((EPSS(I,J),I=1,3),J=1,N4)
WRITE(6,348)((EYSS(I,J),I=1,3),J=1,N4)
WRITE(6,348)((ERPSS(I,J),I=1,3),J=1,N )
348 FORMAT(3F10.5)
WRITE(6,216)
216 FORMAT(/,,,' KINGS LAW KOEFICIJENTI DOBIJENI PRI PROMJENI RPM'/)
WRITE(6,217)(ARPM(I),BRPM(I),I=1,3)
217 FORMAT(2F10.5)
WRITE(6,800)
800 FORMAT(/,,,' KINGOVI KOEFICIJENTI E DOBIJENI NA OSNOVU EFEKTIVNI
*H UGLOVA I EFEKTIVNI UGLOVI'/)
WRITE(6,801)(BAFK(I),AAFK(I),I=1,3)
801 FORMAT(2F10.5)
WRITE(6,366)
366 FORMAT(/,,,' BRZINE U CENTRU TUNELA TEORIJSKE, SRACUNATE NA
*OSNOVU A I B IZ RPM I NA OSNOVU EFEKT UGLOVA I ODB. B '/)
WRITE(6,367)(UINF(J),UINF(I,J),I=1, ), (UINFA(
*L,J),L=1,3),J=1,N3)
367 FORMAT(7F6.4)
SRACUNAVANJE BRZINA PRI PICHU KORISCEN EM EFEKTIVNIH UGLOVA
CF1=COS(AAFK(1))
FIME=SIN(AAFK(1)+AAFK(3))
CF2=COS(AAFK(2))
CF3=COS(AAFK(3))
SF1=SIN(AAFK(1))

```

```

SF2=51N(AAFK(2))
SF3=51N(AAFK(3))
DO 700 I=1,N4
SS1=((EPSS(1,I)**2-ARPM(1))/BAFK(1))* 2
SS2=((EPSS(2,I)**2-ARPM(2))/BAFK(2))* 2
SS3=((EPSS(3,I)**2-ARPM(3))/BAFK(3))* 2
U1=(CF3*SS1-CF1*SS3)/PI*E
U1=(SF3*SS1+SF1*SS3)/PI*E
V1=(SS2-U1*CF2)/SF2
AKAP(1)=W1
UKAP(1)=U1
VKAP(1)=V1
PK=(SS3**2)*(CF3**2+(CF2/SF2)**2)-(CF3*SF3*W1/SF2)**2-(SS2**2-W1**
*2)*(CF3/SF2)**2)+2.*W1*SF3*CF3*CF2*SR T(SS2**2-W1**2)/(SF2**2)
IF(PK) 760,761,761
761 UN=(-W1*SF3*CF3+CF2*SQR T(SS2**2-W1**2)/(SF2**2) +SQR T(PK))/(CF3**
*2+(CF2/SF2)**2)
VN=SQR T(SS2**2-W1**2)/SF2-UN*CF2/SF2
IF(W1) 401,401,402
401 AKOS=AKON(2)
GO TO 404
402 AKOS=AKOK(2)
404 CONTINUE
IF(VN) 406,406,409
406 AKOL=AKON(1)
AKOK=AKON(3)
GO TO 410
409 AKOL=AKOR(1)
AKOK=AKOR(3)
410 CONTINUE
W1=(CF3*SQR T(SS1**2-AKT2*((UN*SF -W1*CF1)**2)-AKOL *(VN**2)
* )-CF1*SQR T(SS3**2-AKT2*((UN*SF3+W1*CF )**2)-AKOK *(VN**2)))/PI*E
UN=(SF3*SQR T(SS1**2-AKT2*((UN*SF 1-W1 *CF1)**2)-AKOL *(
*VN**2))+SF1*SQR T(SS3**2-AKT2*((UN*SF3 W1 *CF3)**2)-AKOK *(VN
**2)))/PI*E
VN=(SQR T(SS2**2-AKT2*((UN * F2-VN*CF2)**2)-AKOS *(W1
**2))-UN *CF2)/CF2
WPAF(1)=(CF3*SQR T(SS1**2-AKT2*((UN*SF 1-W1*CF1)**2)-AKOL *(VN**2)
* )-CF1*SQR T(SS3**2-AKT2*((UN*SF3+W1*CF )**2)-AKOK *(VN**2)))/PI*E
UPSAF(1)=(SF3*SQR T(SS1**2-AKT2*((UN*SF 1-WPAF(1)*CF1)**2)-AKOL *(
*VN**2))+SF1*SQR T(SS3**2-AKT2*((UN*SF3 WPAF(1)*CF3)**2)-AKOK *(VN
**2)))/PI*E
WPAF(1)=(SQR T(SS2**2-AKT2*((UPSAF(1)* F2-VN*CF2)**2)-AKOS *(WPAF
*(1)**2))-UPSAF(1)*CF2)/SF2
700 CONTINUE
ODREDJIVANJE BRZINA PRI YOVU KORISCENI EMEGKTIVNIH UGLOVA
DO 701 I=1,N4
SS1=((EYSS(1,I)**2-ARPM(1))/BAFK(1))* 2
SS2=((EYSS(2,I)**2-ARPM(2))/BAFK(2))* 2
SS3=((EYSS(3,I)**2-ARPM(3))/BAFK(3))* 2
U1=(CF3*SS1-CF1*SS3)/PI*E
U1=(SF3*SS1+SF1*SS3)/PI*E
V1=(SS2-U1*CF2)/SF2
WKAY(1)=W1
UKAY(1)=U1
VKAY(1)=V1
PK=(SS3**2)*(CF3**2+(CF2/SF2)**2)-(CF *SF3*W1/SF2)**2-(SS2**2-W1**
*2)*(CF3/SF2)**2)+2.*W1*SF3*CF3*CF2*SR T(SS2**2-W1**2)/(SF2**2)
IF(PK) 760,703,703
703 UN=(-W1*SF3*CF3+CF2*SQR T(SS2**2-W1**2)/(SF2**2) +SQR T(PK))/(CF3**
*2+(CF2/SF2)**2)
VN=SQR T(SS2**2-W1**2)/SF2-UN*CF2/SF2
IF(W1) 405,405,406
405 AKOS=AKON(2)
GO TO 407
406 AKOS=AKOR(2)
407 CONTINUE
IF(VN) 411,411,412
411 AKOL=AKON(1)
AKOK=AKON(3)
GO TO 413
412 AKOL=AKOR(1)
AKOK=AKOR(3)
413 CONTINUE
W1=(CF3*SQR T(SS1**2-AKT2*((UN*SF -W1*CF1)**2)-AKOL *(VN**2)
* )-CF1*SQR T(SS3**2-AKT2*((UN*SF3+W1*CF )**2)-AKOK *(VN**2)))/PI*E

```



```

UN1=(SF3*SQRT(SS1**2-AKT2*((UN*SF1-W1*CF1)**2)-AKOL*(
*VN**2))+SF1*SQRT(SS3**2-AKT2*((UN*SF3-W1*CF3)**2)-AKOK*(VN
**2)))/PIME
VN1=(SQRT(SS2**2-AKT2*((UN*SF2-VN*CF2)**2)-AKOS*(W1
**2))-UN*CF2)/SF2
WYAF(1)=(CF3*SQRT(SS1**2-AKT2*((UN*SF1-W1*CF1)**2)-AKOL*(VN**2)
)-CF1*SQRT(SS3**2-AKT2*((UN*SF3-W1*CF3)**2)-AKOK*(VN**2)))/PIME
UYSAF(1)=(SF3*SQRT(SS1**2-AKT2*((UN*SF1-WYAF(1)*CF1)**2)-AKOL*(
*VN**2))+SF1*SQRT(SS3**2-AKT2*((UN*SF3-WYAF(1)*CF3)**2)-AKOK*(VN
**2)))/PIME
WYAF(1)=(SQRT(SS2**2-AKT2*((UYSAF(1)*F2-VN*CF2)**2)-AKOS*(WYAF
*(1)**2))-UYSAF(1)*CF2)/SF2
701 CONTINUE
WRITE(6,978)
978 FORMAT(777,' U,V I W PRI PICHU KORI CFNJEM EFEK. UGL. '/')
WRITE(6,501)(UPSAF(I),VPAF(I),WPAF(I) I=1,N4)
501 FORMAT(3F10.4)
WRITE(6,803)
803 FORMAT(777,' U,V I W PRI PICHU KOR SCENJEMEFEK. UGL. I ZANEMARI
*VANJEM BOCHNIH KOMPONENTATA '/')
WRITE(6,501)(UKSAP(I),VKAP(I),WKAP(I) I=1,N4)
WRITE(6,804)
804 FORMAT(777,' U,V I W PRI YOWU KOPI CFNJEM EGKT. UGL. '/')
WRITE(6,501)(UYSAF(I),WYAF(I),WYAF(I) I=1,N4)
WRITE(6,805)
805 FORMAT(777,' U,V I W PRI YOWU KORI CFNJEM EFEKT. UGL. I
*ZANEMARIVANJEM BOCHNIH KOMPON. '/')
WRITE(6,501)(UKSAY(I),VKAY(I),WKAY(I) I=1,N4)
UDREDJIVANJE BRZINA PRI PROMJENI RPM
DO 414 I=1,N3
ERT(1,1)=ERPSS(1,1)
ERT(2,1)=ERPSS(2,1)
ERT(3,1)=ERPSS(3,1)
SS1=((ERT(1,1)**2-ARPM(1))/BAFK(1))**
SS2=((ERT(2,1)**2-ARPM(2))/BAFK(2))**
SS3=((ERT(3,1)**2-ARPM(3))/BAFK(3))**
W1=(CF3*SS1-CF1*SS3)/PIME
U1=(SF3*SS1+SF1*SS3)/PIME
V1=(SS2-U1*CF2)/SF2
WKR(1)=W1
UKSR(1)=U1
VKR(1)=V1
PK=(SS3**2)*(CF3**2+(CF2/SF2)**2)-(CF *SF3*W1/SF2)**2-(SS2**2-W1**
*2)*((CF3/SF2)**2)+2.*W1*SF3*CF3*CF2*S RT(SS2**2-W1**2)/(SF2**2)
IF(PK) 760,415,415
415 UN=( -W1*SF3*CF3+CF2*SQRT(SS2**2-W1** )/(SF2**2) +SQRT(PK))/(CF3**
*2+(CF2/SF2)**2)
VN=SQRT(SS2**2-W1**2)/SF2-UN*CF2/SF2
IF(VN) 416,416,417
416 AKOS=AKON(2)
GO TO 418
417 AKOS=AKOR(2)
418 CONTINUE
IF(VN) 419,419,420
419 AKOL=AKON(1)
AKOK=AKON(3)
GO TO 421
420 AKOL=AKOR(1)
AKOK=AKOR(3)
421 CONTINUE
W1=(CF3*SQRT(SS1**2-AKT2*((UN*SF1-W1*CF1)**2)-AKOL*(VN**2)
)-CF1*SQRT(SS3**2-AKT2*((UN*SF3-W1*CF3)**2)-AKOK*(VN**2)))/PIME
UN=(SF3*SQRT(SS1**2-AKT2*((UN*SF1-W1*CF1)**2)-AKOL*(VN**2)
)+SF1*SQRT(SS3**2-AKT2*((UN*SF3-W1*CF3)**2)-AKOK*(VN
**2)))/PIME
VN=(SQRT(SS2**2-AKT2*((UN*SF2-VN*CF2)**2)-AKOS*(W1
**2))-UN*CF2)/SF2
WRPA(1)=(CF3*SQRT(SS1**2-AKT2*((UN*SF1-W1*CF1)**2)-AKOL*(VN**2)
)-CF1*SQRT(SS3**2-AKT2*((UN*SF3-W1*CF3)**2)-AKOK*(VN**2)))/PIME
URPAF(1)=(SF3*SQRT(SS1**2-AKT2*((UN*SF1-WRPA(1)*CF1)**2)-AKOL*(
*VN**2))+SF1*SQRT(SS3**2-AKT2*((UN*SF3-WRPA(1)*CF3)**2)-AKOK*(VN
**2)))/PIME
WRPA(1)=(SQRT(SS2**2-AKT2*((URPAF(1)*F2-VN*CF2)**2)-AKOS*(WRPA
*(1)**2))-URPAF(1)*CF2)/SF2
414 CONTINUE
WRITE(6,451)

```

```

431 FORMAT(///,' U,V I * PRI PROMJENI PP KORISCENJEM EF. UGL./)
WRITE(6,501)(URPA(I),VRPA(I),WRPA(I) I=1,N3)
WRITE(6,432)
432 FORMAT(///,' U V I W PRI PROMJENI R M I ZAH. ROCN. KOMP./)
WRITE(6,501)(UKSRP(I),VKRP(I),WKRP(I) I=1,N3)
WRITE(6,201)
401 FORMAT(///,' KOLFICIJENTI BLOKIRANJA /)
WRITE(6,200)(AKON(I),I=1,3)
WRITE(6,200)(AKOR(I),I=1,3)
400 FORMAT(3F7.3)
GO TO 705
760 WRITE(6,704)
704 FORMAT(/,' POTKORENA VEL. PRI RES. SI TEMA JEBINACINA NEGATIVNA./)
705 CONTINUE
END

```

PILATION: NO DIAGNOSTICS.

332 PETAH

SIZE(I/D)=0257\*/4152  
TIME: 0472 MSEC.

NAPONI I TEMP. POTREBNI ZA ODR. TEMP. KOREKC.

.63000	.70300	.70000	19.35000
.63000	.69000	.69500	19.47500
.63300	.68000	.68700	19.57500
.63400	.67400	.67900	19.65000
.62000	.65300	.66000	19.77500
.62300	.65000	.66100	19.87500
.62600	.65300	.66500	19.90000
.63900	.68500	.68600	19.50000

NAPONI NA VRHU MOSTA POTREBNI ZA ODR. KOEF. POJAČ.

-.9070	-1.0340	-.9320
-.9230	-1.0240	-.9220
-.9303	-1.0105	-.9100
-.9400	-.9955	-.8960
-.9600	-.9845	-.8830
-.9606	-.9680	-.8635

NAPONI NA DRUGOM STEPENU POJAČ. POTREBNI ZA ODR. KOEF. POJAČ.

.1513	.8470	.8390
.3133	.7330	.7390
.4673	.5940	.6140
.5573	.4330	.4040
.7170	.3100	.3230
.7873	.1390	.1170

NAPCNI DOBIJENI PRI PROMJENI BRZINE JEDNOLIKE STRUJE

.15130	.09230	.08100	19.55000
.31930	.31130	.20230	19.50000
.40730	.40000	.40000	19.50300
.55730	.54000	.58200	19.50000
.63930	.60730	.60000	19.50000
.71700	.70000	.70000	19.57500
.78730	.84700	.84300	19.67500

# NAPONI DOBIJENI PRI PROMJENI UGLA $\varphi$

.75300	.52200	.72300	19.40000
.67800	.32000	.75400	19.42500
.67400	.57500	.70300	19.50000
.65700	.77000	.71500	19.55000
.65200	.62500	.68800	19.57500
.64100	.72200	.69100	19.62500
.63900	.67300	.67900	19.65000

# NAPONI DOBIJENI PRI PROMJENI UGLA $\theta$

.52500	.69400	.79400	19.67500
.70400	.70900	.51900	19.70000
.55000	.66300	.74200	19.87500
.66500	.67800	.56200	19.87500
.59600	.65500	.70500	19.90000
.66300	.66200	.61800	19.90000
.63900	.67300	.67900	19.65000

# REF. TEMP., UGAO NAGIBA SENZORA I KOEF. TANG. KOMP. HLADJ.

20.0000	.6900	.6960	.6980	.1600
---------	-------	-------	-------	-------

# REORIJSKE BRZINE PRI PROMJENI UGLOVA $\varphi$ I $\theta$

3.5023	-.9384	.0000	3.5023	.0000	-.9384
3.5023	.9384	.0000	3.5023	.0000	.9384
3.5707	-.6296	.0000	3.5707	.0000	-.6296
3.5707	.6296	.0000	3.5707	.0000	.6296
3.6120	-.3160	.0000	3.6120	.0000	-.3160
3.6120	.3160	.0000	3.6120	.0000	.3160
3.6258	.0000	.0000	3.6258	.0000	.0000

# BRZINA JEDNOLIKE STRUJE PRI PROMJENI RPM

1.6408	2.3538	2.8608	3.2433	3.6258	4.0083	4.3908
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

# KOEFICIJENTI TEMPERATURSKE KOREKCIJE

1.14498	2.40504	2.10748
-.02613	-.09113	-.07270

# KOEFICIJENTI POJAČIVAČA

-9.54607	-10.19908	-9.02146
-10.69195	-10.68005	-10.58443

# NAPONI POSLIJE TEMPERATURSKE KOREKCIJE

.6673	.4673	.6794
.6650	.7076	.7122
.6609	.5294	.6606
.6452	.7290	.6623
.6409	.5843	.6571
.6312	.6678	.6637
.6299	.6411	.6536
.6105	.6644	.7710
.6902	.6617	.4972
.6507	.6510	.7335

.5617	.6000	.5529
.5954	.6459	.6977
.5604	.6529	.6107
.6239	.6411	.6536
.1395	.6513	.6483
.5052	.2057	.2259
.4542	.4210	.4302
.5442	.5010	.5456
.6252	.6217	.5496
.7005	.7219	.7357
.7768	.8160	.6194

# NAPONI PRERAČUNATI NA VRH MOSTA

-.9572	-.9907	-.9165
-.9549	-1.0208	-.9190
-.9547	-1.0045	-.9153
-.9532	-1.0232	-.9168
-.9528	-1.0097	-.9144
-.9519	-1.0194	-.9150
-.9518	-1.0150	-.9141
-.9412	-1.0172	-.9252
-.9530	-1.0168	-.8993
-.9450	-1.0100	-.9210
-.9506	-1.0174	-.9040
-.9454	-1.0154	-.9183
-.9546	-1.0101	-.9100
-.9510	-1.0150	-.9141
-.9059	-.9598	-.8509
-.9215	-.9798	-.8757
-.9334	-.9944	-.8930
-.9433	-1.0019	-.9039
-.9515	-1.0152	-.9137
-.9530	-1.0226	-.9218
-.9037	-1.0316	-.9297

# NAPONI KORIGOVANI ZA "CROSS-TALK"

-.99270	-1.03426	-.95205
-.99000	-1.06275	-.95553
-.99027	-1.04010	-.95008
-.98904	-1.05903	-.95201
-.98843	-1.04527	-.95002
-.98704	-1.05509	-.95077
-.98745	-1.05005	-.94973
-.97008	-1.05286	-.96006
-.99300	-1.05439	-.93491
-.98003	-1.05105	-.95731
-.99228	-1.05301	-.94020
-.98405	-1.05111	-.95392
-.99030	-1.05175	-.94509
-.98745	-1.05005	-.94973
-.93903	-.99347	-.89059
-.95507	-1.01420	-.90803
-.97000	-1.02932	-.92792
-.97900	-1.03714	-.93915
-.98700	-1.04880	-.94933
-.99409	-1.05049	-.95777
-1.00195	-1.06778	-.96597

# KOEFICIJENTI $A_i$ I $B_i$ DOBIJENI UPOTREBOM STV. UGLOVA

.00200	.18595
.71348	.23116
.53231	.21916

KOEFICIJENTI  $B_1$  DOBIJENI UPOTREBOM EFEKTIVNIH UGL. I EF. UGL.

.17065	.39970
.22174	.54251
.20062	.47613

BRZINE JEDNOLIKE STRUJE; STVARNE, ODREĐJENE UPOTREBOM STV. UGL. I ODREĐJENE UPOTREBOM EFEKTIVNIH UGLOVA

1.0408	1.0116	1.0109	1.8326	1.7946	1.7682	1.7889
2.0508	2.0539	2.4039	2.2997	2.3318	2.3472	2.2449
2.0008	2.9045	2.0967	2.9104	2.8772	2.8303	2.8410
3.2433	3.2708	3.1757	3.2937	3.2401	3.1008	3.2151
3.0238	3.0293	3.0165	3.0659	3.5952	3.5312	3.5725
4.0003	3.9994	4.0005	3.9928	3.9016	3.9140	3.0975
4.0908	4.3515	4.4073	4.3206	4.3107	4.3033	4.2234

U, v i w PRI PROMJENI UGLA  $\varphi$

3.5376	-.9353	.0136
3.0107	.8018	-.0213
3.0691	-.0208	.0210
3.0930	.5855	.0004
3.0935	-.3308	.0203
3.0947	.3124	-.0002
3.0037	-.0024	.0208

PRVE APROKSIMACIJE U, v i w PRI PROMJENI UGLA  $\varphi$

3.7876	-1.2649	.1040
3.7977	.5101	-.0513
3.7046	-.8010	.1090
3.7025	.4101	-.0202
3.0432	-.3813	.0523
3.0339	.2034	-.0155
3.0137	.0009	.0158

U, v i w PRI PROMJENI UGLA  $\theta$

3.5335	-.0955	-.9580
3.5224	-.0027	.9118
3.5032	-.0203	-.0272
3.5711	-.0215	.0431
3.5032	.0135	-.3194
3.0093	.0012	.3275
3.0037	-.0024	.0208

PRVE APROKSIMACIJE U, v i w PRI PROMJENI UGLA  $\theta$

3.5409	.2004	-.9326
3.5339	.3812	.8795
3.5730	.1302	-.6134
3.5838	.2125	.0195
3.0937	.0021	-.3147
3.0201	.0099	.3137
3.0137	.0089	.0150

U, v i w PRI PROMJENI BRZINE JEDNOLIKE STRUJE

1.7910	-.0392	.0034
2.2872	.0949	.0900
2.0530	-.0518	.0308
3.2141	-.1934	.0102
3.5848	-.0923	.0162
3.3335	-.0345	.0700
4.2703	.0520	.0939

PRVE APROKSIMACIJE U, v i w PRI PROMJENI BRZINE JEDN. STR.

1.7970	-.0342	.0039
2.2992	.0977	.0099
2.0030	-.0423	.0351
3.2379	-.2035	.0227
3.3977	-.0832	.0135
3.3459	-.0195	.0637
4.2034	.0002	.0876

KOEFICIJENTI BLOKIRANJA AKON(I) I AKOR(I)

2.704	1.222	1.109
1.423	1.700	2.087



## PODACI POTREBNI ZA DIGITALIZACIJU DOKTORSKE DISERTACIJE

**Ime i prezime autora:** Vukoslavčević Petar

**Godina rođenja:** 18.05.1949

**E-mail:** petarvuk@ucg.ac.me

**Organizaciona jedinica Univerziteta Crne Gore:** Mašinski fakultet

**Naslov doktorske disertacije:** Razvoj anemometarskih sonda sa X-vlaknima i odgovarajućih metoda mjerenja longitudinalnih komponenti vrtložnosti i brzine pri turbulentnom strujanju fluida”

**Prevod naslova na engleski jezik:** The development of the anemometry probes with X-wires and related methods to measure the longitudinal components of vorticity and velocity in turbulent fluid flows

**Datum odbrane:** 06/1981 g.

Signatura u Univerzitetskoj biblioteci<sup>1</sup>

Naslov, sažeci, ključne riječi (priložiti dokument sa podacima potrebnim za unos doktorske disertacije u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore) Izjava o korišćenju (priložiti potpisanu izjavu)

Napomena

---

<sup>1</sup> Podatak o signaturi (lokaciji) može ispuniti biblioteka organizacione jedinice/Univerzitetska biblioteka

## **PODACI POTREBNI ZA UNOS DOKTORSKE DISERTACIJE U DIGITALNI ARHIV UNIVERZITETA CRNE GORE**

**Prevod naslova disertacije na engleski jezik:** The development of the anemometry probes with X-wires and related methods to measure the longitudinal components of vorticity and velocity in turbulent fluid flows

### **Mentor i članovi komisija (za ocjenu i odbranu):**

Dr Wallace James, Department of mechanical engineering, University of Maryland, USA-mentor

Dr Ašković Radomir, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu.

Dr Hanjalc Kemal, Mašinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu.

Dr Vujošević Luka, Mašinski fakultet, Univerzitet "Veljko Valhovič" Titograd.

### **Sažetak \***

Prezentovana je analiza i mjerenje efekata bočnih komponenti brzine i gradijenata longitudinalne komponente brzine na tačnost mjerenje komponenti brzine i longitudinalne komponente vrtložnosti, sa ortogonalnim X-senzor sondama, u turbulentnim strujnim poljima. Po prvi put su konstruisana su dva tipa minijaturnih sonde; X sonda sa četiri senzora sa izdvojenim nosačima za svaki senzor, kojom se mogu mjeriti sve tri komponente brzine i longitudinalna komponenta vrtložnosti i sonda sa tri senzora kojom se mogu mjeriti samo sve tri komponente brzine. Pokazano je da gradijenti longitudinalne komponente brzine, koji mogu biti iste veličine kao i srednji tangentni napon na zidu, izazivaju izuzetno velike greške mjerenja bočnih komponenti brzine i longitudinalne komponente vrtložnosti. Takođe je pokazano da maksimalna greška mjerenja longitudinalne komponente vrtložnosti, kao posledica greške mjerenja bočnih komponenti brzine, može biti čak i veća nego u slučaju kada se ove komponente zanemare. Data su smjernice za prevazilaženje problema tačnosti mjerenja brzinskog i vrtložnog strujnog polja.

### **Sažetak na engleskom (njemačkom ili francuskom) jeziku:**

An analysis and measurements of the effects of the spanwise velocity components and streamwise velocity gradients on the velocity components and streamwise vorticity component, measured in turbulent flow with a pair of orthogonal hot-wire X-arrays probes, is presented. Two types of miniature probes has been constructed for the first time; four wire X-array probe with separate prongs for each wire, capable of simultaneous measurements of all three velocity components and streamwise vorticity component and a three sensors probe capable of simultaneous measurement of all three velocity components only. It is shown that the streamwise velocity gradients, which can have the same order of magnitude instantaneously as the mean shear stress at the wall, cause extremely large errors in the measured instantaneous cross-stream velocity and streamwise vorticity components. It is also shown that the maximal error in vorticity measurements, as a consequence of the errors in cross-stream velocity components measurements, can be even higher than if the cross-stream velocity components are neglected. A way around these errors in velocity and vorticity is also presented.

**Ključne riječi:** turbulentno strujanje, vrtložnost, termalna anemometrija, vrtložne sonde, sonde sa X-vlaknima,

**Ključne riječi na engleskom jeziku:** Turbulent flow, vorticity, thermal anemometry, vorticity probes, X-wire probes

**Naučna oblast/uža naučna oblast:** Mehanika fluida/termalna anemometrija

**Naučna oblast/uža naučna oblast na engleskom jeziku:** Fluid mechanics/Thermal anemometry

Ostali podaci

\* Ukoliko je predviđeni prostor za polja Sažetak, Sažetak na engleskom jeziku, Ključne riječi i Ključne riječi na engleskom jeziku neдовоľan, priložiti ih u zasebnom prilozu.

## IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u **Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore** unese doktorsku disertaciju pod naslovom:

***Razvoj anemometarskih sondi sa X-vlaknima i odgovarajućih metoda mjerenja longitudinalnih komponenti vrtložnosti i brzine pri turbulentnom strujanju fluida***

koja je moj autorski rad.

Doktorska disertacija, pohranjena u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore, može se koristiti pod uslovima definisanim licencom Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la<sup>1</sup>.

### **Autorstvo**

Autorstvo – bez prerada

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Autorstvo – nekomercijalno

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

**U Podgorici, 07.02.2022.**

**Potpis doktoranda**

---

<sup>1</sup> Odabrati (čekirati) jednu od šest ponuđenih licenci (kratak opis licenci dat je na poledini ovog priloga)

### **Autorstvo**

Licenca sa najširim obimom prava korišćenja. Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Djelo se može koristiti i u komercijalne svrhe.

### **Autorstvo – bez prerada**

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

### **Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima**

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerade se moraju distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

### **Autorstvo – nekomercijalno**

Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

### **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada**

Licenca kojom se u najvećoj mjeri ograničavaju prava korišćenja djela. Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

### **Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima**

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija, javno saopštavanje i prerada djela, pod uslovom da

se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerada se mora distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Djelo i prerade se ne mogu koristiti u komercijalne svrhe.