

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Дејан Б. Илић

Ђорђе С. Чантрак

**ПРАКТИКУМ  
ЗА ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ВЕЖБЕ  
ИЗ МЕРЕЊА  
ПРИ СТРУЈАЊУ ФЛУИДА**

ДРУГО ИЗДАЊЕ

Београд, 2022.

**Назив књиге**

Практикум за лабораторијске вежбе из мерења при струјању флуида  
Друго издање, 2022.

**Аутори**

ван. проф. др Дејан Б. Илић, дипл.инж.маш.  
ван. проф. др Ђорђе С. Чантрак, дипл.инж.маш.

**Рецензенти:**

проф. др Мирослав Бенишек, дипл.инж.маш.  
проф. др Јелена Илић, дипл.инж.ел.

**Издавач:**

Универзитет у Београду, Машински Факултет  
11120 Београд 35, Краљице Марије 16  
тел: (+381 11) 3302-200 и (+381 11) 3302-384, факс: (+381 11) 3370-364

**За издавача**

Декан проф. др Владимир Поповић, дипл.инж.маш.

**Главни и одговорни уредник**

проф. др Милан Лечић, дипл.инж.маш.  
Председник комисије за издавачку делатност Машинског факултета у  
Београду

Штампање II издања одобрили:

Комисија за издавачку делатност Машинског факултета у Београду и  
Декан Машинског факултета одлуком бр. 21/2022 од 01.09.2022. године

**Тираж**

100 примерака

**Штампа**

ПЛАНЕТА ПРИНТ, Рувелтова 10, 11000 Београд

© Забрањено прештампавање и фотокопирање. Сва права задржава издавач и аутори.

ISBN 978-86-6060-132-4

## **Предговор другом издању**

Садржај практикума је практично остао неизмењен. У овом издању исправљен је само мали број уочених словних грешака.

У Београду, септембар 2022. год.

Аутори

## **Предговор првом издању**

Практикум је превасходно намењен студентима који имају лабораторијске вежбе из мерења при струјању флуида из одређеног броја обавезних и изборних предмета на основним академским, мастер академским и докторским студијама Катедре за хидрауличне машине и енергетске системе: Основе технике мерења, Техника мерења и сензори, Мерења у хидроенергетици, Мерења у турбулентним струјањима и др.

У оквиру три тематске целине практично су обрађена мерења најзначајнијих физичких величина при струјању флуида: притиска, брзине (протока) и температуре, и то кроз еталонирање (калибрацију) мерила притиска, мерила брзине и мерила протока. Посебан део практикума је посвећен савременим оптичким методама мерења брзине струјања, које се често сматрају еталонским методама, од којих ПИВ мерна техника до сада није детаљно обрађивана у домаћој уџбеничкој литератури. Еталонирање наведених мерила је неопходно обавити пре сваког мерења енергетских карактеристика турбомашина (турбина, пумпи, компресора и вентилатора). Стога, овај практикум може послужити као увод из мерења енергетских карактеристика хидрауличних машина, која се обављају на Катедри за хидрауличне машине и енергетске системе.

Свако поглавље, са припадајућом показном лабораторијском вежбом, садржи: изводе из теорије или теоријски осврт, циљ мерења, опис мерне инсталације, опис мерног поступка (припреме за мерење и ток мерења) и

обраду и приказ резултата мерења. Пре сваког рада, у лабораторијама, студенти се морају упознати са мерама заштите на раду и морају поштовати процедуре за рад на инсталацијама и са мерном опремом.

Аутори су захвални бившим и садашњим члановима наставног особља Катедре за хидрауличне машине и енергетске системе (раније Катедре за хидроенергетику), као и руководиоцима домаћих и међународних пројеката, који су дали значајан допринос развоју катедарских лабораторија (пројектовање и израда опитних инсталација и постројења, набавка мерне опреме, акредитација лабораторија, итд.). Посебну захвалност изражавају др Мирославу Бенишеку, редовном професору у пензији (за пројектовање и израду инсталације за еталонирање мерила протока, набавку мерне опреме кроз сарадњу са привредом и пројекте МНТР-а, израду класичних сонди, итд.), проф. др Милошу Недељковићу (за набавку мерне опреме у оквиру пројеката ХЕТИП, ЈУП, итд.), др Светиславу Чантраку, редовном професору у пензији (за набавку ПИВ система), сараднику докторанду Новици Јанковић, дипл.инж.маш. (за огроман допринос раду инсталација и опреме), проф. др Јелени Илић и научном саветнику др Славици Ристић, у пензији, Институт ГОША. Захвални су и бившим студентима Модула за хидроенергетику: др Владимиру Шкари, мас.инж.маш. Горану Микићу, мас.инж.маш. Бојани Ковач и мас.инж.маш. Милану Раковићу, који су, кроз израду дипломског, мастер рада или стручне праксе М - ХЕН, допринели раду инсталација и опреме описаних у овом практикуму. Захвалност дугују и рецензентима овог практикума на корисним сугестијама и дискусијама.

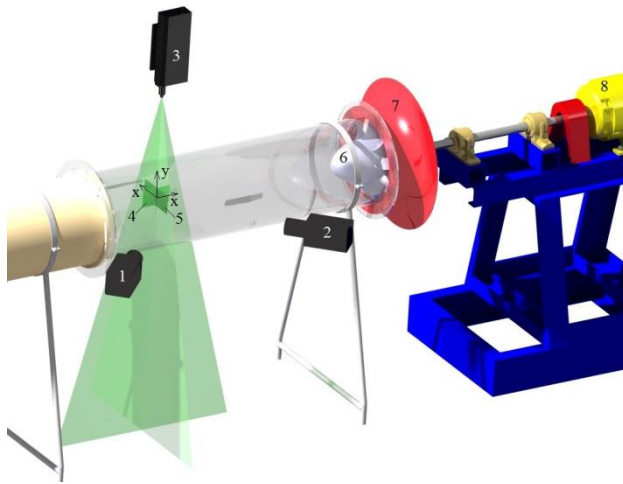
Овде је приказан само део мерења који студенти практично могу да обаве у лабораторијама Катедре за хидрауличне машине и енергетске системе. Практикумом се жели истаћи значај експерименталног рада у школовању будућих инжењера на техничким факултетима.

## Садржај

1	МЕРЕЊЕ ПРИТИСКА И ЕТАЛОНИРАЊЕ МЕРИЛА ПРИТИСКА.....	1
1.1	Мерење статичког и тоталног притиска.....	1
1.2	Еталонирање мерила притиска.....	3
1.3	Еталонирање електричног мерила притиска помоћу гасног клипног калибратора "Ruska 2470" .....	10
1.4	Еталонирање механичког мерила притиска са Бурдоновом опругом помоћу уљног клипног калибратора "Amsler" .....	18
2	МЕРЕЊЕ БРЗИНЕ СТРУЈАЊА И ЕТАЛОНИРАЊЕ МЕРИЛА БРЗИНЕ .....	23
2.1	Еталонирање цилиндричне сонда са три рупице на отвореном аеротунелу В.....	27
2.2	Еталонирање анеометра са крилцима и термалне анеометарске сонде на отвореном аеротунелу М .....	38
2.3	Примена оптичких техника мерења брзине.....	44
2.3.1	Мерење брзине струјања помоћу ЛДА .....	49
2.3.2	Мерење брзине струјања помоћу ПИВ мерне технике.....	76
3	МЕРЕЊЕ ПРОТОКА И ЕТАЛОНИРАЊЕ МЕРИЛА ПРОТОКА.....	113
3.1	Еталонирање мерне бленде и ултразвучног протокомера.....	120
	ПРИЛОГ.....	131
	Литература.....	141

**Стратегија спровеђења експеримента - мерења турбулентног вихорног струјања иза кола аксијалног вентилатора**

Током СПИВ мерења камере се постављају у положај за снимање са расејавањем светлости уназад због безбедности и могућности боље манипулације у раду са ласером. Поставка стерео ПИВ мерења је у оба пресека изведена на исти начин (слика 59).



Слика 59. СПИВ поставка у пресеку 1: 1- лева CCD камера, 2- десна CCD камера, 3- Nd:YAG ласер, 4- вертикална меридијанска раван, 5- попречни пресек, 6- аксијални вентилатор ЗП, 7- профилисани уводник и 8- погонски електромотор

Оријентација координатног система мете  $(x, y)$  дата је и за попречни (слика 61, поз. 5) и за меридијански пресек (слика 61, поз. 4) у складу са софтверском конвенцијом.

Пустити у рад аксијални вентилатор преко тиристорског регулатора. Стајати у оси обртања аксијалног вентилатора. Брзину обртања пратити преко фотоћелије. Подесити брзину обртања на жељену вредност и то на пример  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ . Проверити да ли је навучен параван. Обезбедити да нема

пролазника кроз лабораторију. Узети заштитну опрему - одговарајуће наочаре и маску. Пустити дим из димног генератора. Започети снимање у континуалном моду и проверити фокусираност честица и SNR (signal to noise ratio) кликом на слике. Избор вредности  $\Delta t$  извршити на основу пробних снимака на којима се посматра кретање честица. Уколико се честица не види јасно у два узастопна снимка време се смањује, али уколико се чини да је честица „замрзнута“, односно да се не покреће, онда је потребно повећати  $\Delta t$ . Уколико смо задовољни, започети снимање брзином узорковања 2 Hz и 400 снимака. Обрадити неколико снимак за проверу и то задавањем претходно генерисаног калибрационог фајла и процедуру обраде која је дефинисана у следећем потпоглављу, односно на слици 60. Уколико је број интерполираних вектора мањи од 5%, зауставити експеримент гашењем димног генератора и лаганим успоравањем и искључивањем вентилатора.

## **Обрада и приказ резултата мерења**

### ***Анализа поузданости ПИВ система, алгоритми обраде података и мерна несигурност***

Укупна грешка мерења се дефинише као разлика између стварне вредности и измерене ([1], [3], [33], [41], [44]). Постоје систематска и случајна грешка. Извори системске грешке, у случају СПИВ мерења су калибрација и аквизиција података. Стандардна девијација се користи за оцену случајне грешке. Детаљна анализа свих грешака, која је у складу са коришћеним ПИВ системом је дата у раду [41].

Грешка приликом калибрације настаје услед неодговарајућег постављања мете у односу на ласерски лист, као и услед формирања мапирајућих функција простора. Третирање оба проблема је изнето у поглављу Раванска и стерео калибрација ПИВ система, као и детаљно у [41]. С обзиром на начин одређивања брзине у СПИВ методи, тачност мерења брзине директно зависи

од мерне несигурности мерења помераја  $\Delta x$  и мерне несигурности временског интервала у коме је настало то померање. Мерна несигурност при ПИВ мерењима брзине се рачуна на следећи начин за једну компоненту брзине [23]:

$$\frac{\sigma_u}{u_{max}} = \frac{\sigma_{\Delta x}}{\Delta x_{max}} + \frac{u\sigma_{\Delta t}}{\Delta x_{max}}, \quad (26)$$

где је  $\sigma_{\Delta t} = 10 \text{ ns}$  за импулсне ласере, па је  $\frac{u\sigma_{\Delta t}}{\Delta x_{max}} \leq 0,01$  за  $u \leq 1000 \text{ m/s}$ .

Вредност грешке мерења времена је мала. Оквирне вредности за  $\Delta t$  су наведене у табели 14. Она зависи од брзине струјања, тако да зависи од типа и угла вентилатора. Аналогно изразу (26), [34] наводи следећи израз за одређивање мерне несигурности:

$$\frac{\sigma_u^2}{u^2} = \frac{\sigma_{\Delta x}^2}{\Delta x^2} + \frac{\sigma_{\Delta t}^2}{\Delta t^2}. \quad (27)$$

У оквиру [34] приказује се и принцип одређивања мерне несигурности.

На основу једначина (26 и 27) следи да је главни извор грешке померај честице  $\Delta x$ .

Да би се што тачније одредило померање честица, поред дефинисаног померања, морају се испунити следеће препоруке за просејавање флуидне струје:

- просејавање је добро уколико постоји пет парова у оквиру сваке интерогационе површи,
- провера да ли је честица већа од пиксела како би се избегло блокирање пиксела,
- фокус камере који се накнадно подешава према честицама пре самих мерења и
- проверити време  $\Delta t$ .

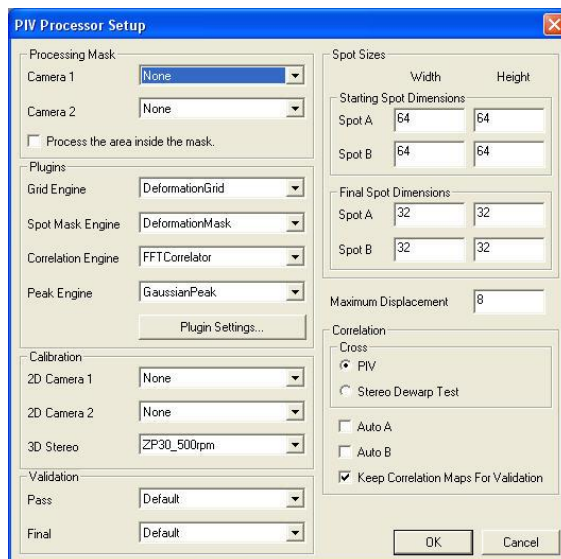


Сви ови поступци су укључени у оквиру софтверског пакета INSIGHT 3G. Постоји више могућих комбинација обраде кроз Grid Engine, Spot Mask Engine, Correlation Engine и Peak Engine. Битно је ваљано подесити и величину интерогационе површи и максималног помераја честице. Не постоји идеално решење, већ се разним комбинацијама долази до најповољнијег зависно од самог струјања.

Предлог алгоритма за наведени експеримент:

- Grid Engine: Deformation grid алгоритам – Central Difference Image Correction [58], и то Primary Iteration 2 и Secondary Iteration 1,
- Spot mask Engine: Deformation Mask,
- correlation Engine: FFT correlator и
- Peak Engine: Gaussian Peak.

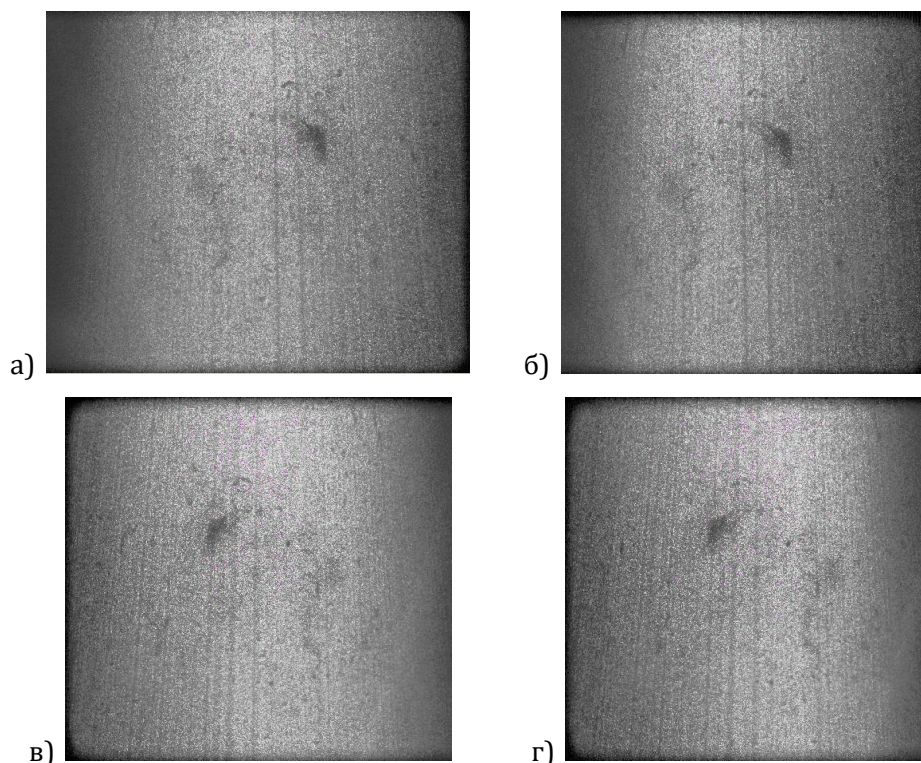
Полазна величина интерогационог прозора за оба пара снимка (од обе камере) је  $64 \times 64$  [pix<sup>2</sup>], а завршна  $32 \times 32$  [pix<sup>2</sup>]. Максимални померај честице је 8 pix. Валидација векторског поља је обављена применом филтера локалног осредњавања величине  $3 \times 3$  (слика 60).



Слика 60. Подешавање процесора за обраду података у софтверу INSIGHT 3G

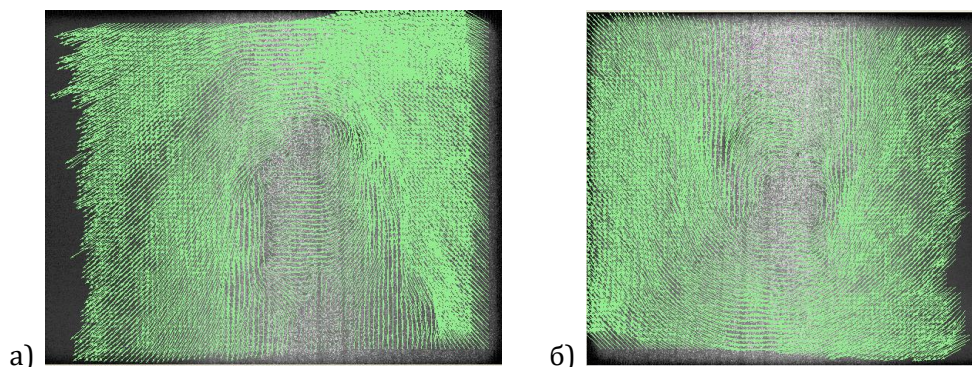
Овај метод са четири пролаза користи интерогациону површ од  $32 \times 32$  [pix<sup>2</sup>] и има финално преклапање од 75% на крају. Прва два пролаза су се састојала од рекурзивне мреже за одређивање целобројног померања у пикселима, док су следећа два корака користила деформациону мрежу са четири угла како би се побољшала мерна тачност. Валидација векторских поља је извршена користећи стандардни критеријум брзина и  $3 \times 3$  локални филтер за осредњавање. Алгоритам задржава тачност просторног померања мању од приближно 0,1 пиксела, тако да је грешка просторног померања мања од 2,5% за померање честице величине четири пиксела.

На сликама 61а-г се могу видети парови снимака за обе камере за СПИВ поставку између којих се врши корелација. За пример је дат приказ за вентилатор ЗП30, режим струјања  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ , мерења у попречном пресеку 2, први пар снимака од 400 у низу.



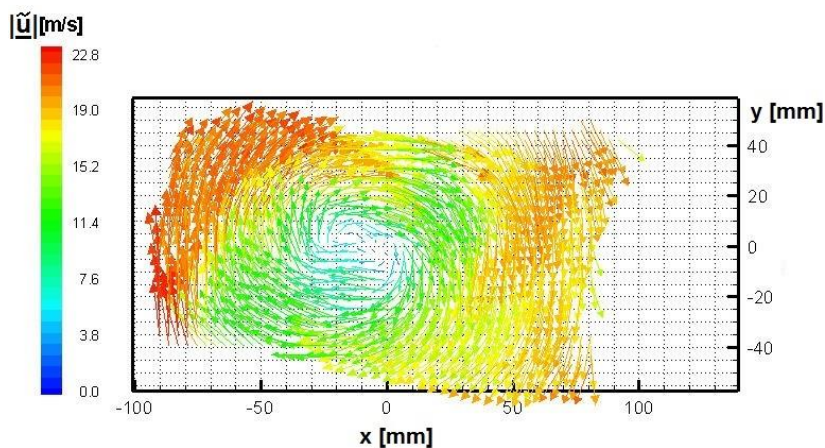
Слика 61. Корелациони снимци за леву а) и б) и десну в) и г) камеру

Овим снимцима одговара претходно приказана калибрација. Може се видети да је осветљеност мерне површи уједначена код свих снимака, што је такође од значаја за тачност мерења. Применом наведеног алгоритма на претходним снимцима, добијају се вектори брзине како је то дато на следећим сликама.



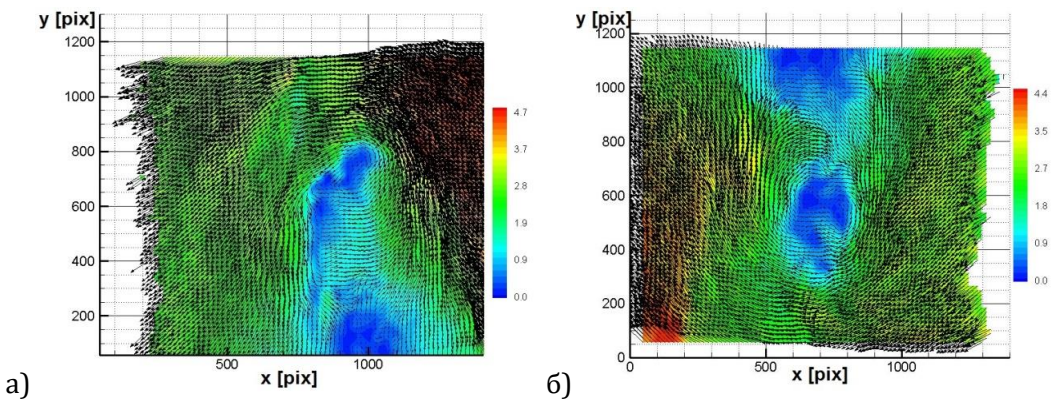
Слика 62. Вектори брзине за а) леву и б) десну камеру

Комбинацијом претходних снимака добија се просторно поље брзине, које је приказано са половином укупног броја вектора у два управна правца (слика 63).



Слика 63. Приказ укупног поља брзине за ЗП30, режим  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ , мерења у попречном пресеку 2, први пар слика

Примена наведеног алгоритма на левом пару снимака доводи до 5640 добрих вектора брзине и 116 интерполираних вектора. Други пар снимака је резултирао са 5414 добрих вектора брзине и свега 100 интерполираних вектора. Како је укупан број вектора у првом случају 5756, а у другом 5514, то значи да је удео интерполираних вектора приближно 2% у првом случају, односно 1,81% у другом случају. Према препорукама, мерења су прихватљива уколико је овај износ до 5%. Исти поступак се понавља и за осталих 400 снимака. Удео интерполираних вектора се, наравно, мења од снимка до снимка, али нигде не прелази 5% за све приказане режиме рада. На крају, обрадом истих снимака са слике 61, али у пикселима, добија се слика 64 за леву и десну камеру.



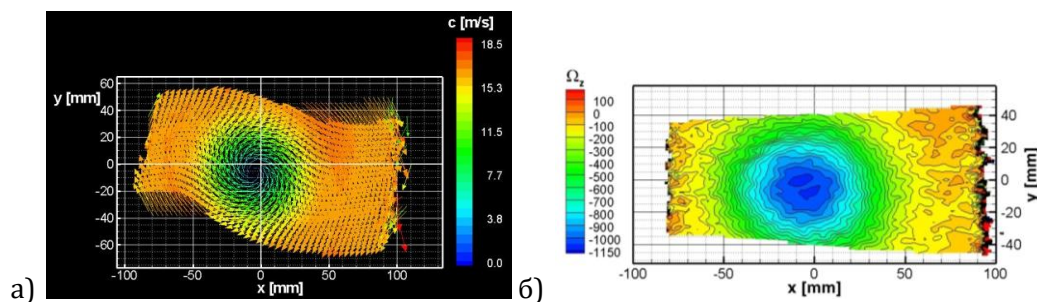
Слика 64. Вектори брзине у пикселима за а) леву и б) десну камеру

Евидентно је да обе камере у области вртложног језгра дају мале помераје и то реда величине око 0,4 pix, док се у остатку попречног пресека достижу вредности и преко 4 pix. Коришћене корелационе технике имају могућност процене помераја честице у интервалу до 0,1 pix [41], односно и до 0,05 pix због хардвера. Следи да се грешка налази у интервалу од  $0,05/0,4 \cdot 100 = 12,5\%$  у области вртложног језгра до  $0,05/4 \cdot 100 = 1,25\%$  у области смицајног и основног струјања. То је последица снимања целе области вртложног језгра са једним истим временским размаком између два ласерска пулса  $\Delta t$ .

Фокусирањем само на област вртложног језгра, свакако би се добиле мање вредности грешке. Дефинисањем грешке одређивања помераја и времена  $\Delta t$ , а на основу једначине (26) која даје мерну несигурност одређивања брзине, потврђује се закључак да је грешка помераја доминантна. Укупна мерна несигурност целог мерења, добија се узимањем у обзир свих системских и случајних грешака датих у [41].

### Приказ резултата експеримента

Укупна брзина  $c$  [m/s] и средња вртложност  $\Omega_z$  за брзину обртања вентилатора ЗП30 у пресеку  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ , добијена применом стерео ПИВ система, приказана је на следећој слици. Мерења су обављена у попречном пресеку димензија  $180 \times 90 \text{ mm}$  и центром који се поклапа са осом цеви. Добијени вектори су приказани за осредњено поље од 400 снимака, који су формирано снимањем са учестаношћу  $2 \text{ Hz}$  (слика 65). Постоји и могућност бржег мерења брзином од  $7 \text{ Hz}$ , уколико се снимање врши директно у RAM рачунара. Број снимака је тада ограничен величином RAM-а.

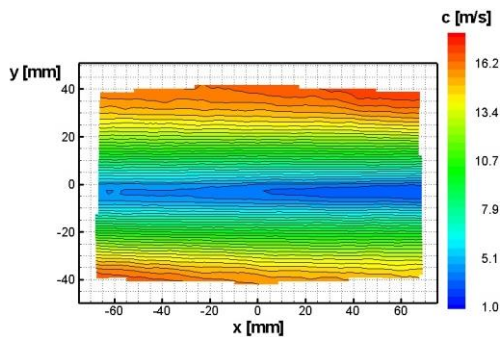


Слика 65. Вентилатор ЗП30, брзина обртања  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ , попречни мерни пресек 1: а) укупна брзина и б) средња вртложност

Вртложност се израчунава на основу осредњеног поља брзина у попречном пресеку применом методе коначних разлика и то централне схеме [46]. Она се

дефинише релацијом  $\Omega_z = \partial c_y / \partial x - \partial c_x / \partial y$ , где су  $c_x$  и  $c_y$  компоненте укупне брзине у правцу  $x$  и  $y$ -осе редом.

У пресеку 1 су урађена и мерења у вертикалној меридијанској равни. Резултати временски осредњене расподеле укупне брзине у меридијанском пресеку 1 за вентилатор ЗП30 на основу 400 снимака и брзине снимања од 2 Hz приказани су на слици 66. Наглашава се да је, на основу слике 59 поз. 4, смер главног струјања у негативном смеру  $x$ -осе.



Слика 66. Укупна брзина за вентилатор ЗП30 за режим  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$  у вертикалном меридијанском пресеку 1

Снимање у вертикалној меридијанској равни је обављено у пресеку 1 на површини од 120 x 80 mm. Резултати показују слагање са мерењима у истом попречном пресеку. Приметна је симетрија струјања у односу на положај који је 5mm испод осе цеви.

Из ових експерименталних резултата је могуће добити компоненте брзине, као и на њих применити статистичку обраду података и праћење динамике вртложног језгра.

Дакле, приказати добијене резултате на начин како је то дато на претходној слици.

CIP – Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

532.5.08(075.8)(076)

**ИЛИЋ, Дејан Б., 1975-**

Практикум за лабораторијске вежбе из мерења при струјању  
флуида / Дејан Б. Илић, Ђорђе С. Чантрак.

- 2. изд. – Београд : Универзитет, Машински Факултет, 2022  
(Београд : Планета принт). – 143 стр. : илустр. ; 24 cm

Тираж 100. – Библиографија: стр. 141-143

ISBN 978-86-6060-132-4

1. Чантрак, Ђорђе С., 1977- (аутор)

а) Хидраулика - Мерења - Вежбе

COBISS.SR-ID 73696265