

POROVNÁNÍ VÝPOČTU A MĚŘENÍ METODOU PIV RADIÁLNÍHO OBĚŽNÉHO KOLA ČERPADLA

Miloslav Haluza*, Pavel Zubík**

THE COMPARISON OF THE COMPUTATION AND MEASUREMENT BY PIV METHOD OF RADIAL IMPELLER

Summary: The almost radial impeller has been measured by PIV method for comparison with computational processes (CFD method and most simple singularity method). In the runner are the local swirl and point of stagnation – two features for computational testing. The comparison of flow field (measured and computed) can give us the view of computational accuracy of velocity (and pressure) field in the runner.

1. Úvod

Oběžné kolo poměrně velmi jednoduchého, téměř čistě radiálního oběžného kola čerpadla bylo podrobena experimentálnímu výzkumu a měřeno velmi jemně metodou PIV.

V kanále oběžného kola se vyskytuje lokální vír a stagnační bod. Měření sloužilo především k porovnání přesnosti výpočtů, a to jak CFD metod, tak metod jednodušších výpočtů pomocí metody singularit. Právě porovnání těchto výpočtů s měřením je obsahem tohoto článku.

2. Geometrie oběžného kola

Oběžné kolo čerpadla je, jak již bylo zmíněno, téměř zcela radiální. Počet oběžných lopatek (válcových) je 5, úhel lopatky na náběžné hraně $\beta_1 = 20^\circ$, na odtokové hraně $\beta_2 = 28^\circ$. Úhel opásání lopatky je $\varphi_c = 110^\circ$. Tloušťka lopatky je 6 mm, na vstupu je oběžná lopatka profilovaná na vstupní radius $R = 2,25$ mm. Tvar oběžné lopatky je vidět na výsledku řešení (obr. č. 3-5). Na oběžné kolo navazuje difuzor.

3. Provozní body

Oběžné kolo bylo zkoušeno při třech provozních režimech. Ve všech režimech jsou otáčky $n = 1200$ / min . Průtoky Q (l/s) jsou následující:

- a) 23,9 l/s,
- b) 12,2 l/s,
- c) 7,8 l/s.

Vstup do oběžného kola je proveden příváděcím potrubím $\phi 100$ mm, výtlač je potrubí $\phi 125$ mm. Tlaky, měřené na sacím potrubí před oběžným kolem (p_1) a tlaky, měřené na výtlačném potrubí (p_2) jsou následující:

	p_1 [kPa]	p_2 [kPa]
a)	97,5	232,00
b)	102,85	256,95
c)	104,05	259,75

* Ing. Miloslav Haluza, CSc.: VUT v Brně, FSI, EÚ, Odbor hydraulických strojů V. Kaplana, Technická 2, 616 69 Brno, tel.: 541 142 335, e-mail: vvhal@khzs.fme.vutbr.cz

** Ing. Pavel Zubík, Ph.D.: VUT v Brně, FAST, ÚVST – Laboratoř vodohospodářského výzkumu; Veverí 95, 662 37 Brno; tel.: 541 147 286, e-mail: Zubik.P@fce.vutbr.cz

Výpočet měrné energie:

Měrná energie mezi vstupem a výstupem se stanoví ze vztahu:

$$\Delta Y = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + (h_2 - h_1) \cdot g, \quad (1)$$

kde $h_1 = 1,225(m)$, $h_2 = 1,457(m)$ jsou polohy snímačů na sacím a výtlačném potrubí vůči vztažné rovině (podlaze zkušebny).

Vztah (1) lze ještě upravit $\left(v = \frac{Q}{S} \right)$, takže:

$$\Delta Y = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot Q^2 \cdot \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) + (h_2 - h_1) \cdot g.$$

Dosažena měrná energie je v provozních bodech dána měřením:

- a) $\Delta Y = 134,492 J / kg,$
- b) $\Delta \varphi = 155,6636 J / kg,$
- c) $\Delta Y = 157,685 J / kg.$

4. Výpočty proudění v oběžném kole metodou singularit

Pro tři provozní body byly provedeny výpočty metodou singularit. Dosažené parametry oběžným kolem jsou při 100% účinnosti:

- a) $\Delta Y_{100\%} = 174,917 J / kg,$
- b) $\Delta Y_{100\%} = 198,8484 J / kg,$
- c) $\Delta Y_{100\%} = 207,9507 J / kg.$

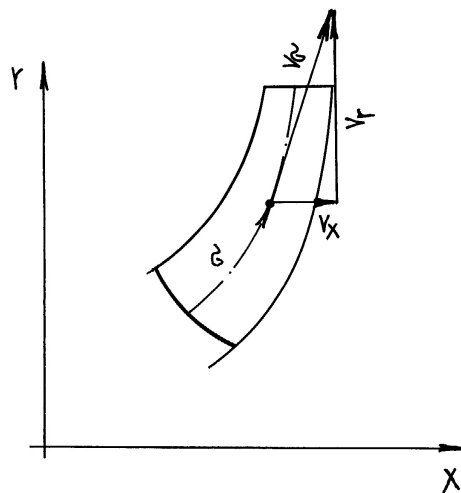
Z těchto vypočtených výsledků lze určit celkovou účinnost čerpadla v provozních bodech:

- a) $\eta_c = \frac{\Delta Y}{\Delta Y_{100\%}} = 76,89\%,$
- b) $\eta_c = 78,2826\%$
- c) $\eta_c = 75,828\%.$

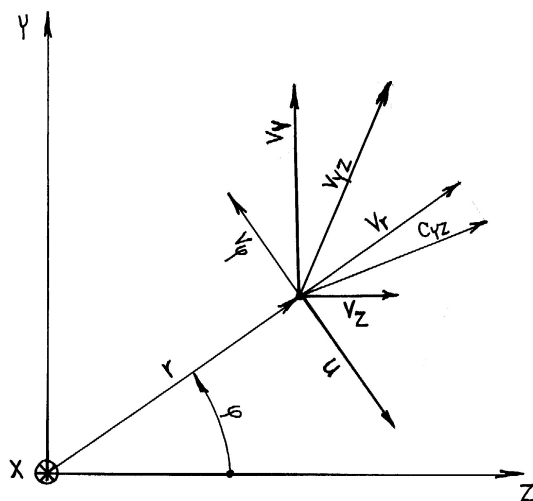
To jsou účinnosti zcela reálné, je patrné, že optimum stroje se nachází v provozním bodě b).

5. Výpočty proudění uvnitř kanálu oběžného kola

Pomocí upraveného programu pro výpočet proudění metodou singularit uvnitř rotujícího kanálu lze zjistit vektory relativní rychlosti ve směru unášivém (v_φ) a ve směru proudnice σ (v_σ). Pokud by oběžné kolo nemělo čistě radiální tvar, rozkládá se rychlost v_σ do směru axiálního (v_x) a do směru radiálního (v_r) a obvodového (v_φ), jak je naznačeno na obr. č.1 a 2.



Obr. 1 Rozložení relativní rychlosti v_σ na složky v_x , v_r



Obr. 2 Rozložení relativní rychlosti v_r a v_φ na složky v_y , v_z a jejich orientace vůči obvodové rychlosti u a absolutní rychlosti c_{yz} v rovině yz

Pro přepočítání platí vztahy:

$$v_x = v_\sigma \cdot \cos \gamma, \quad (3)$$

$$v_r = v_\sigma \cdot \sin \gamma, \quad (4)$$

a protože platí

$$v_z = v_r \cdot \cos \gamma - v_\varphi \cdot \sin \varphi, \quad (5)$$

$$v_y = v_r \cdot \sin \gamma + v_\varphi \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

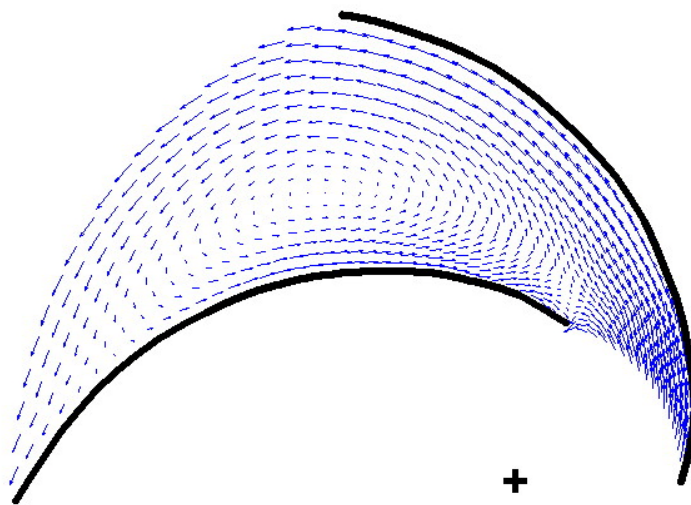
je možné s použitím rovnic (3) a (4) psát konečné vztahy

$$v_z = v_\sigma \cdot \sin \gamma \cdot \cos \varphi - v_\varphi \cdot \sin \varphi, \quad (7)$$

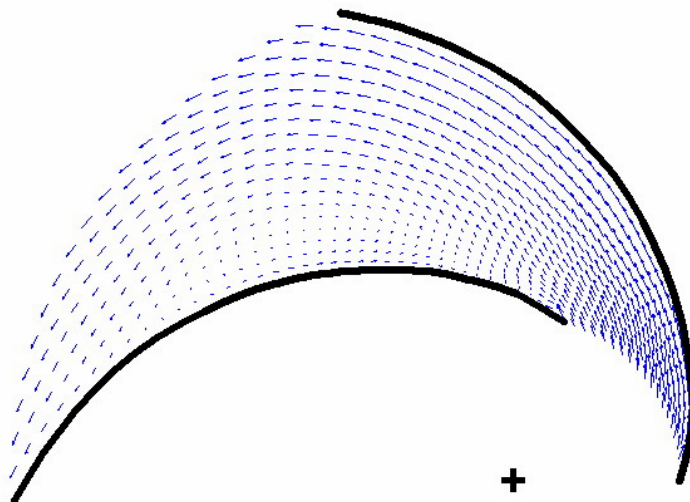
$$v_y = v_\sigma \cdot \sin \gamma \cdot \sin \varphi + v_\varphi \cdot \cos \varphi. \quad (8)$$

Rychlost v_σ byla vypočtena metodou singularit, souřadnice bodů y, z jsou dány vztahy $y = r \cdot \sin \varphi, z = r \cdot \cos \varphi$.

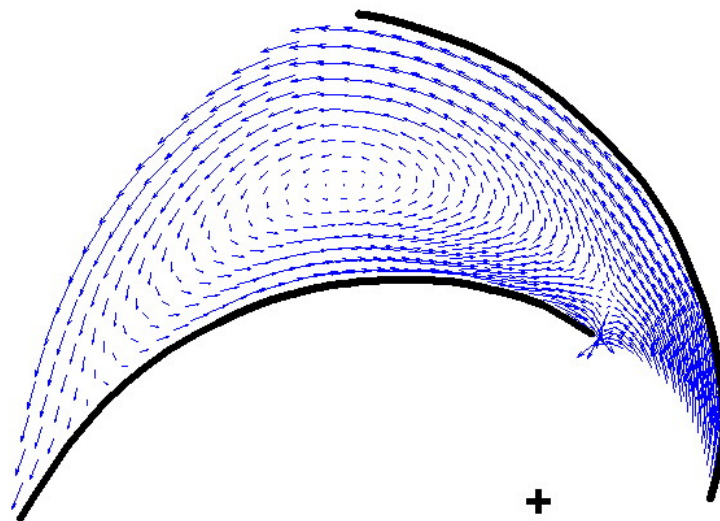
Výsledky těchto výpočtů proudění v kanále oběžného kola jsou znázorněny na následujících obrázcích (v rovině $y z$, což je rovina kolmá na osu stroje x) pro režimy proudění a,b,c. Tyto výsledky lze přímo porovnat s měřením PIV, které je uvedeno v následující kapitole.



Obr. 3 Výpočet proudění v kanále oběžného kola v režimu a)



Obr. 4 Výpočet proudění v kanále oběžného kola v režimu b)



Obr. 5 Výpočet proudění v kanále oběžného kola v režimu c)

6. Měření metodou PIV

6.1 Popis použitého měřicího zařízení

Byl použit měřicí komplet FlowMap pro měření metodou PIV od dánské firmy Dantec Dynamics. Souprava sestává z dvojitého pulzního Nd:YAG laseru s maximální energií v jednom záblesku 120 mJ, optických prvků (válcová čočka s dalšími optickými členy) vytvářejících laserovou světelnou rovinu, speciální digitální kamery, vyhodnocovacího procesoru a řídicího počítače třídy PC.

6.2 Zkušební trať

Pro měření byl využit existující zkušební okruh rotočerpadla v laboratoři Odboru hydraulických strojů Victora Kaplana, Energetického ústavu, Fakulty strojní, VUT v Brně. Okruh sestává z čerpadla poháněného elektromotorem řízeným frekvenčním měničem, zásobní tlakové nádrže, propojovacího potrubí a armatur, indukčního průtokoměru a tlakových čidel před a za čerpadlem. Rotočerpadlo bylo v dílnách Sigma VVÚ upraveno zhotovením optického vstupu pro laser v boční stěně spirály a zkrácením dvou lopatek rozvaděče, pro umožnění realizace měření proudění v mezilopátkovém kanálu oběžného kola.

6.3 Postup měření

Počátkem dubna 2002 bylo provedeno měření s využitím nového pulzního laseru v rozvaděči rotočerpadla. Čerpadlo bylo v původní konfiguraci, tak jak bylo upraveno pro měření proudění v rozvaděči v roce 1999. Účelem bylo prověřit očekávané zlepšení kvality měření a především rozšíření oblasti měřitelných rychlostí na celý provozní rozsah čerpadla (původní osvětlovací systém se vyznačoval omezením maximální měřitelné rychlosti na 2 m/s a vyvolával nutnost provádět měření při značně snížených otáčkách).

Kvalita provedených měření plně potvrdila očekávání a oprávněnost nákupu nového pulzního laseru.

Vlastní měření sestávalo z:

1. Několikerého napuštění vody do zkušební okruhu, rozběhnutí a zastavení čerpadla a vypuštění vody – zkušební trať trpí velkou „nectností“ vyplývající z použití obyčejných a ne nerezových ocelových trub – voda v okruhu se zakaluje rží.
2. Optická soustava vytvářející laserovou světelnou stěnu byla ustavena do roviny ležící v polovině výšky mezilopatkového kanálu rozvaděče. Osvětleny byly dva sousedící kanály. Při průběžné snaze zahájit měření bylo zjištěno, že v zakalené vodě neumožní provádět PIV měření žádné zvyšování výkonu laseru.
3. Po vyčištění vody ve zkušebním okruhu bylo již možno provádět měření s využitím přirozeně se vyskytujících částic. Po přidání částic získaných z odpadu výroby polystyrénu (levné částice kterými je možno sytit větší objemy vody) však bylo dosaženo výrazně vyšší kvality měření.
4. Postupně bylo vždy měřeno několik dlouhých sérii okamžitých stavů rychlostního pole popisujících jeden konkrétní režim chodu čerpadla spolu s údaji o otáčkách, průtoku a tlacích na sání a na výtlaku z čerpadla.

Koncem dubna 2002 proběhlo jednání s pracovníky Sigma VVÚ. Na základě všech doposud získaných zkušeností a požadavků na následující experiment bylo rozhodnuto o provedení dalších konkrétních úprav na rotočerpadle a byl stanoven předběžný plán následujícího měření v oběžném kole.

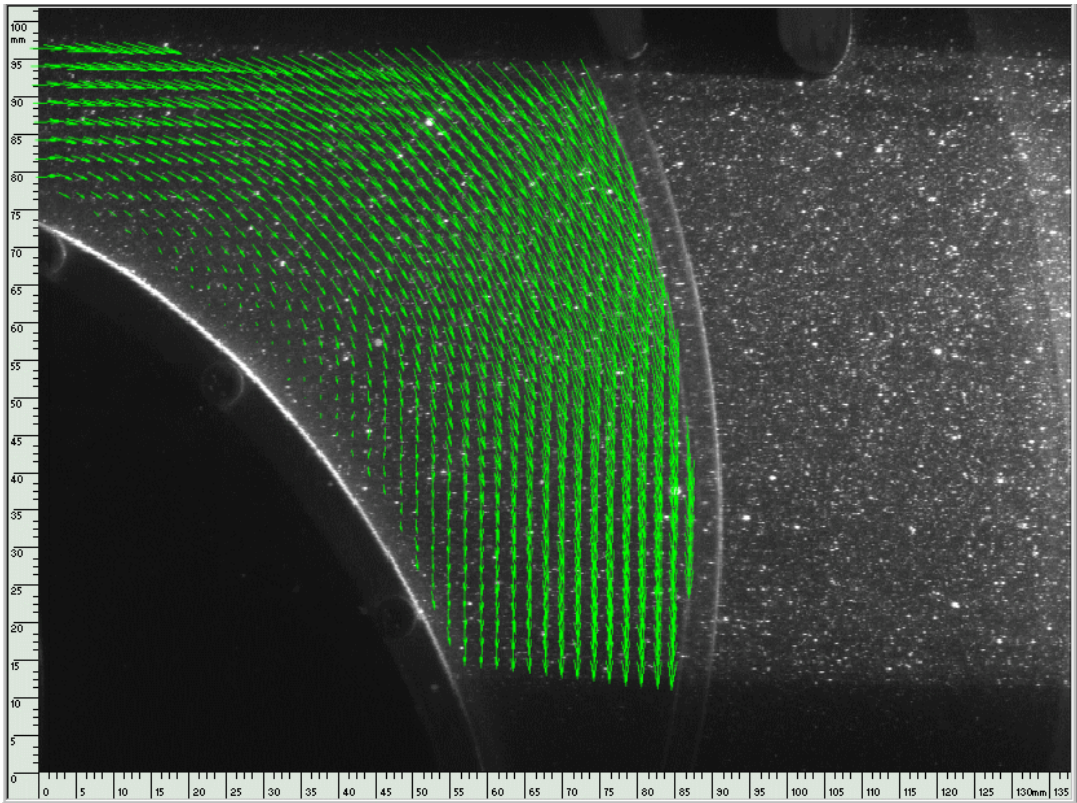
Po provedení všech potřebných úprav na modelu (včetně zhotovení a přešetření nového průhledného krycího disku kola a natření všech potřebných ploch uvnitř čerpadla speciální matnou černou barvou) bylo v polovině listopadu 2002 opět zahájeno měření. Následovala další konzultace s pracovníky Sigma VVÚ a byl stanoven následující plán měření v oběžném kole:

1. Provést měření pro 3 průtoky a to při otáčkách 1200/min ($Q = 24$ l/s, $Q = 12$ l/s, $Q = 8$ l/s).
2. Pro každý průtok získat sérii měření (po 30 vzorcích) pro 5 různých poloh lopatky oběžného kola vůči statoru.
3. Vyhodnotit okamžité i časově střední hodnoty složek rychlosti.
4. Provést pro vhodné otáčky vizualizaci počátku kavitace.

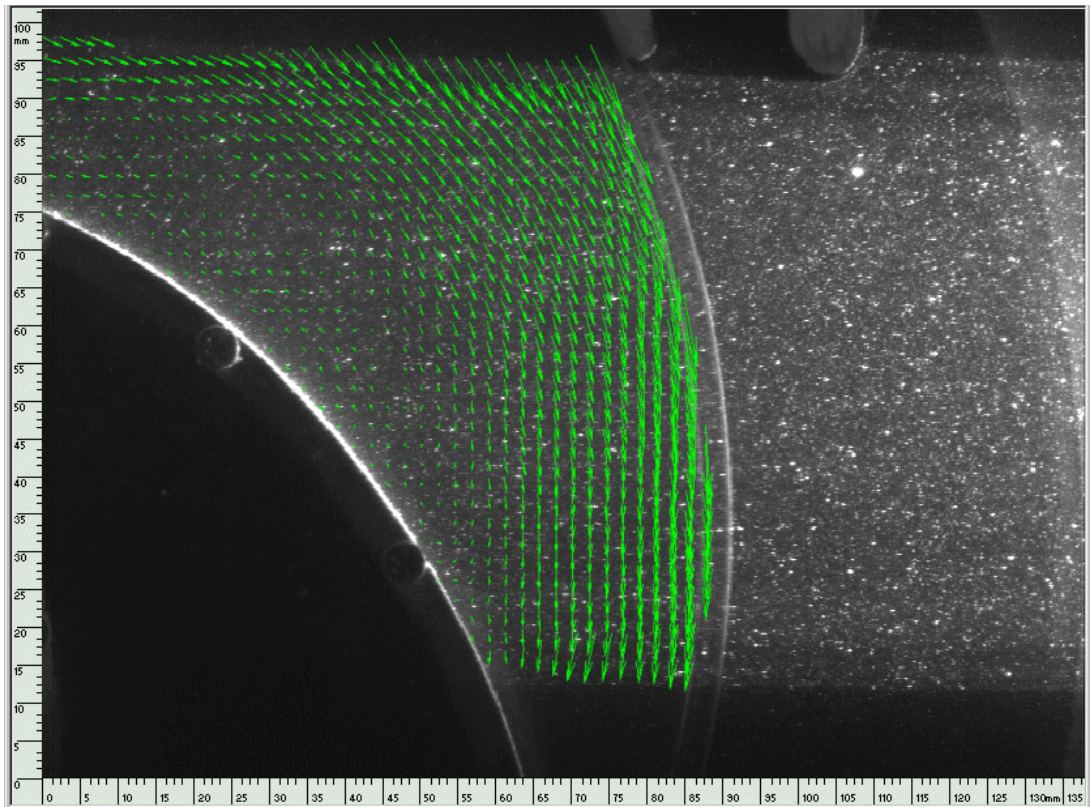
6.4 Zpracování měření

Výstupem ze zde popisovaných měření je rozložení absolutních rychlostí bez rozdílu zda se jedná o prostor statoru nebo rotoru. Pro účely verifikace výše popisovaného matematického modelu byl proveden přepočít na relativní rychlosti v oběžném kole. Na obrázcích číslo 6 až 8 jsou příklady časově středních polí relativních rychlostí na pozadí vstupní obrazové informace (mimo jiné tyto fotografie ukazují rozměry a polohu měřených oblastí).

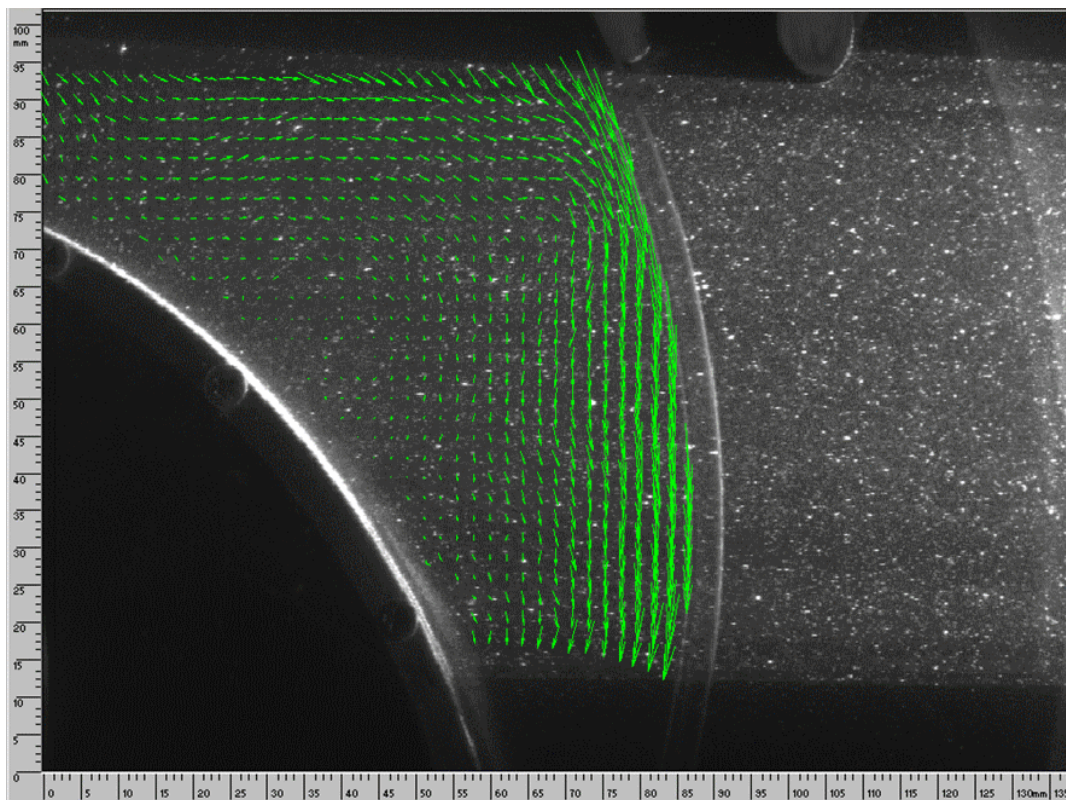
Pro objektivní porovnání výsledků matematického modelu s výsledky experimentu lze informaci o vyhodnocených vektorových polích kvantifikovat formou tabelárních hodnot x-ové a y-ové souřadnice a velikosti x-ové a y-ové složky rychlosti pro každý vektor v poli.



Obr. 6 Časově střední relativní rychlosti v režimu a)



Obr. 7 Časově střední relativní rychlosti v režimu b)



Obr. 8 Časově střední relativní rychlosti v režimu c)

7. Závěr

Jak je z uvedených výsledků měření a výpočtů patrné, je změřený lokální vír vyskytující se v oběžném kole, poněkud menší, než je stanoveno výpočtem. To je jev zcela logický – musíme mít na paměti, že singularitní výpočty lopatkových mříží pracují s neviskózní kapalinou. Mají však jednu nespornou výhodu. Porovnáním jejich korekce oproti skutečnosti lze velmi rychle a poměrně kvalitně provádět hydraulické návrhy oběžných kol odstředivých čerpadel.

8. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory grantu MPO č. FB – C3/80/00 „Zvýšení užité hodnoty hydraulických strojů cestou intenzifikace parametrů a uplatněním vyspělých technologií“.

9. Literatura

- [1] Fleischner, P., Nechleba, M. : Hydromechanika lopatkových strojů, SNTL Praha, 1976.
- [2] Bláha, J., Brada, K. : Příručka čerpací techniky, ČVUT Praha, 1997.