

CFD analýza článkových čerpadel v turbínovém režimu

Jiří Šoukal¹, Milan Sedlář²

Anotace

Současné možnosti numerického modelování jsou velmi silné. Umožňují modelovat proudové poměry v celém interiéru čerpadlového stupně velmi věrně. Svědčí o tom i kvalita predikce následných integrálních vnějších pracovních charakteristik stupně založená na schopnosti zvládnutí mechanismu ztrát.

Příspěvek prezentuje výsledky modelování turbínového režimu stupně článkového čerpadla nejnovější hydraulické koncepce a srovnání s výsledky modelování stupně článkového napájecího čerpadla staršího designu. Již porovnání obrazu rychlostního a tlakového pole dává poznatky o sladění profilových mříží rotoru a statoru a následně pracovních charakteristik.

Výsledky práce slouží jednak k ošetření nestandardních režimů stroje, jednak k aktivnímu využití turbínového režimu článkového čerpadla v procesu rekuperace energie.

1. Úvod

Vodní elektrárny hrají výraznou roli v oblasti stability a bezpečnosti chodu elektrizační soustavy. Díky svým dynamickým vlastnostem se uplatňují při normálním provozu, ale především při mimořádných stavech, jako je rychle startující záloha, ostrovní provoz či black-start ([1]). Hlavním problémem pro větší rozšíření vodních a malých vodních elektráren je jednak nedostatek lokalit vyhovujících z ekologického hlediska a zajišťujících rychlou návratnost stavebních investic, jednak vysoká cena konstrukce a výroby vlastní turbíny i náklady na údržbu a obsluhu elektrárny. Jedním z možných řešení je použití čerpadel schopných provozu v turbínovém režimu. Na trhu lze nalézt poměrně široké spektrum vhodných čerpadel; přitom jejich nákupní cena i náklady na údržbu jsou výrazně nižší než u vodních turbín. Pro účely stabilizace chodu elektrizační soustavy jsou vhodná jak čerpadla jednostupňová určená pro malé a střední spády (využitelná např. pro klasické malé vodní elektrárny), tak i článková čerpadla vhodná pro velké spády; jejich cena je přitom nepoměrně menší než cena Peltonovy turbíny.

Zatímco u jednostupňových spirálních čerpadel existuje řada podkladů, zabývajících se proudovými poměry v hydraulických částech stroje a vnějšími charakteristikami, u článkových čerpadel jsou tyto informace v současné době velmi limitované ([2] - [6]). Hlavním cílem tohoto příspěvku je ukázat, že článkové čerpadlo moderní koncepce může dosahovat v turbínovém režimu velmi vysoké účinnosti, a to i bez potřeby nákladných úprav vyrobených dílů. Dalším cílem je ale také na základě numerického modelování proudových jevů objasnit, jak může vzájemné sladění profilových mříží ve stupni čerpadla ovlivnit pracovní charakteristiky stroje. Vzhledem k tomu, že některá čerpadla byla již testována v turbínovém režimu na zkušebně SIGMA Výzkumného a vývojového ústavu s.r.o. v Lutíně, výpočty je možné (alespoň částečně) porovnat s experimentálními výsledky.

Vzhledem k tomu, že obsahem článku je analýza proudových jevů v článkových čerpadlech (byť provozovaných v turbínovém režimu), veškeré použité názvosloví odpovídá hydraulickému návrhu a konstrukci čerpadel.

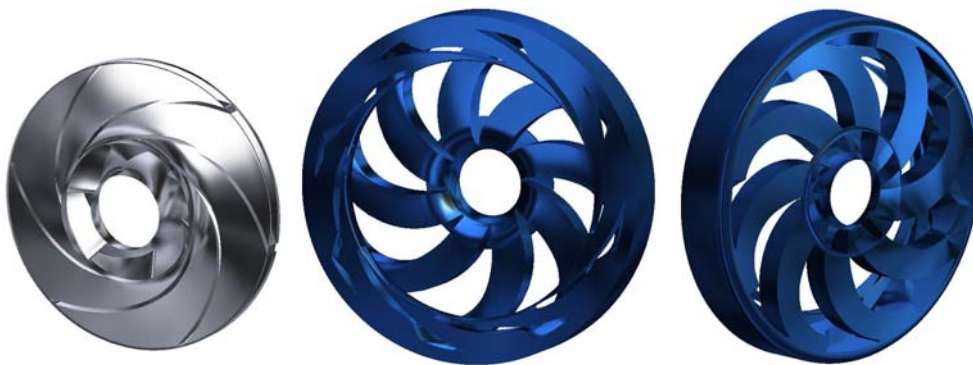
¹ Ing. Jiří Šoukal, CSc., SIGMA Výzkumný a vývojový ústav, s.r.o., Jana Sigmunda 79, Lutín
tel.: +420 585 652 401, fax: +420 585 652 400, e-mail: jiri.soukal@sigma-vvu.cz

² RNDr. Milan Sedlář, CSc., SIGMA Výzkumný a vývojový ústav, s.r.o., Jana Sigmunda 79, Lutín
tel.: +420 585 652 423, fax: +420 585 652 400, e-mail: milan.sedlar@sigma-vvu.cz

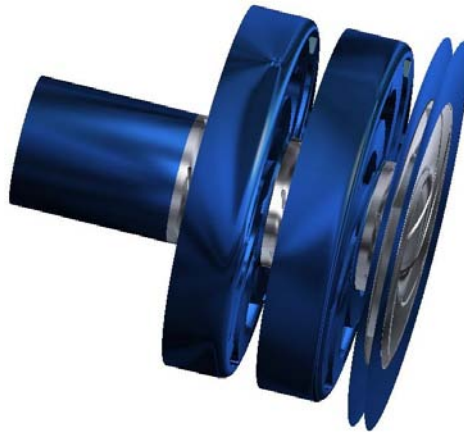
2. Výpočtové modely

Z důvodu možnosti porovnání je v příspěvku provedena CFD analýza dvou článkových čerpadel různé hydraulické koncepce. První z nich (čerpadlo CUD4-7.1) představuje nejnovější hydraulickou koncepci s kanálovým statorem, druhé čerpadlo (150CHM) má starší koncepci založenou na statoru s klasickou rozváděcí a převáděcí mříží. Vzhledem k tomu, že tato čerpadla jsou uvažována ve víceúrovňovém provedení, u kterého je snížen vliv sacího a výtlačného tělesa na vnější charakteristiky, analýza se soustředí na proudění ve středním stupni čerpadla.

Střední stupeň článkového čerpadla CUD4-7.1 je tvořen radiálním oběžným kolem se šesti lopatkami a statorem kanálového typu s osmi kanály (obr. 1). Z důvodů maximální přesnosti postihu interakce rotoru a statorových částí stupně byla provedena plně nestacionární analýza ve dvou po sobě jdoucích stupních, což snižuje chyby vnesené středováním vstupní okrajové podmínky před dalším stupněm. Aby byla zadána korektně vstupní a výstupní okrajová podmínka, byla před první oběžné kolo vřazena část rovného potrubí s hřídelí a za druhý stupeň přidáno další oběžné kolo, které ústí do bezlopatkové mezery. Celá výpočetní oblast tak zahrnuje tři oběžná kola a dva statory (obr. 2).



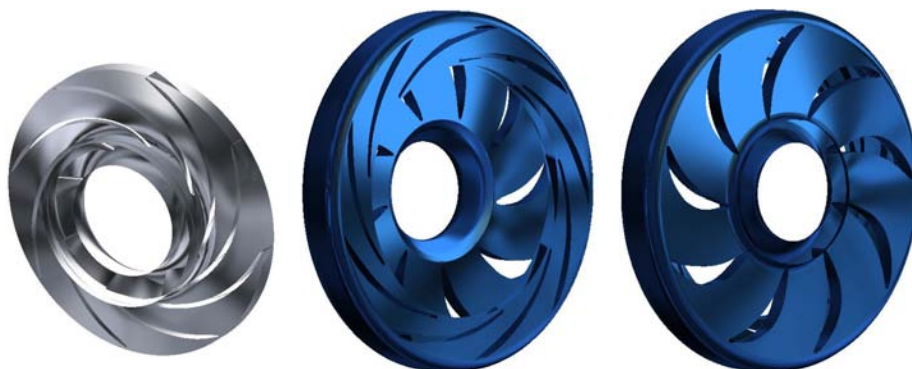
Obr. 1. 3D geometrie oběžného kola a statoru čerpadla CUD4-7.1



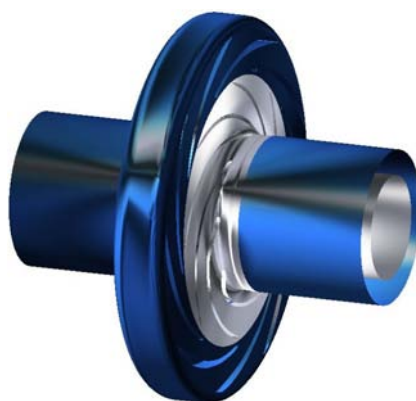
Obr. 2. Výpočtová oblast. Čerpadlo CUD4-7.1

Střední stupeň článkového čerpadla 150CHM je tvořen radiálním oběžným kolem s osmi lopatkami a statorem lopatkového typu s devíti rozváděcími a devíti převáděcími lopatkami (obr. 3). Z důvodu možnosti dodatečného porovnání s experimentálními daty získanými v SIGMA VVÚ v rámci projektu ROTOČERPADO byl výpočet proveden pro konfiguraci podobnou jako v případě experimentu. Tato konfigurace zahrnuje střední stupeň čerpadla 150CHM s axiálním vstupem i výstupem (obr. 4). Výpočet byl opět realizován jako plně nestacionární analýza.

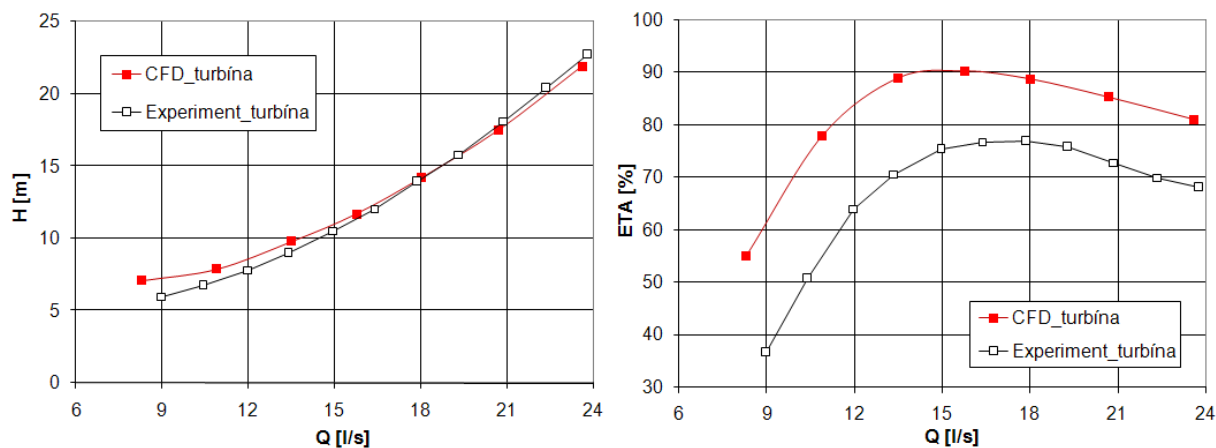
Pro řešení byl použit CFD systém ANSYS CFX pro řešení plně nestacionárních středovaných Navier-Stokesových rovnic doplněný o Menterův SST model turbulence. Výpočtové sítě jsou víceblokové strukturované a představují cca 1.5 mil uzlových bodů.



Obr. 3. 3D geometrie oběžného kola a statoru čerpadla 150CHM



Obr. 4. Výpočtová oblast. Čerpadlo 150CHM



Obr. 5. Spočítané a naměřené vnější charakteristiky v turbínovém režimu. Hydraulika CUD4-7.1, 1000 ot/min

3. Výsledky numerické analýzy

CFD analýza byla provedena pro obě čerpadla v turbínovém režimu pro různé otáčky; z důvodu rozsahu jsou v tomto příspěvku u obou čerpadel uvedeny pouze výsledky pro jednu otáčku.

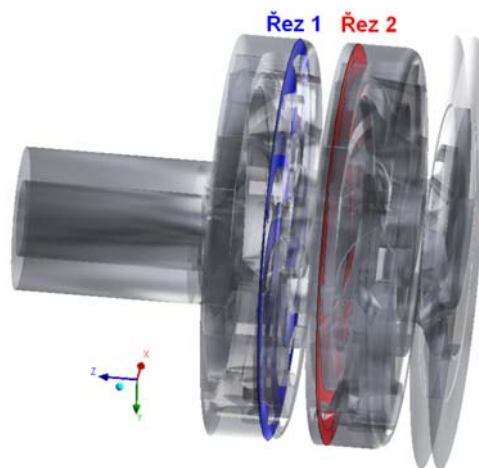
3.1 Čerpadlo CUD4-7.1

U tohoto čerpadla jsou analyzovány otáčky $n = 1000 \text{ ot./min.}$ a uvažovaný provozní rozsah je $8.3 - 23.6 \text{ l/s}$ při optimálním průtoku 14.9 l/s . Maximální hydraulická účinnost stupně je v turbínovém režimu poměrně vysoká, cca 90.5% . Obrázek 5 ukazuje porovnání vypočítaných vnějších charakteristik s experimentálními daty, které byly získány při turbínových zkouškách na čtyřstupňovém provedení čerpadla. Je nutné zdůraznit, že výsledkem CFD analýzy je hydraulická

účinnost, zatímco experimentální data reprezentují celkovou účinnost včetně diskových a mechanických ztrát. Z tohoto hlediska rozdíl mezi naměřenou a spočítanou účinností odpovídá velmi dobře odhadu ztrát, které nejsou zahrnuty do výpočtového modelu. Co se týká posunu naměřeného optimálního průtoku doprava (vzhledem k výpočtovým hodnotám), ten je způsoben především objemovými ztrátami v těsnících kruzích.

Pro snadnější vyhodnocení proudových jevů v interiéru stupně čerpadla byly zavedeny dva pomocné řezy kolmé na osu rotace. První ("Řez1") je umístěn v polovičce výšky převáděcích lopatek prvního statoru (ve smyslu proudění v čerpadle), druhý řez ("Řez2") se nachází mezi nosným a krycím diskem druhého oběžného kola, uprostřed výšky odtokové hrany (obr. 6).

Obrázky 7 - 8 ukazují proudění ve stupni čerpadla CUD4-7.1 v turbínovém režimu při průtoku v blízkosti optima ($Q = 15.75$ l/s). Na obrázku 7 jsou proudnice relativní rychlosti v řezech 1 a 2. V interiéru oběžného kola se nevyskytuje žádné odtržení proudu. Co se týká proudění uvnitř statoru, je situace poněkud složitější. Zde lze detekovat pro všechny průtoky lokální odtržení, která souvisejí se složitým obrazem sekundárního proudění. Kromě lokálních odtržení lze nalézt ve statoru i globální odtržení, která jsou hlavní příčinou vysokých energetických ztrát. Všechna tato odtržení ve statoru je zpravidla obtížné lokalizovat. Z tohoto důvodu se kromě proudnic relativní rychlosti v řezech výpočtovou oblastí často používají i povrchové proudnice, které vytvářejí charakteristické obrazce se singulárními čarami a singulárními body ([7]). Pro globální odtržení je většinou možné identifikovat i oblast zpětného proudění. Na obrázku 8 jsou ukázány detaily malých globálních odtržení ve statoru v místech, kde dochází k interakci statoru s náběžnou hranou lopatek oběžného kola a v místech, kde rozváděcí část kanálu přechází v převáděcí část.



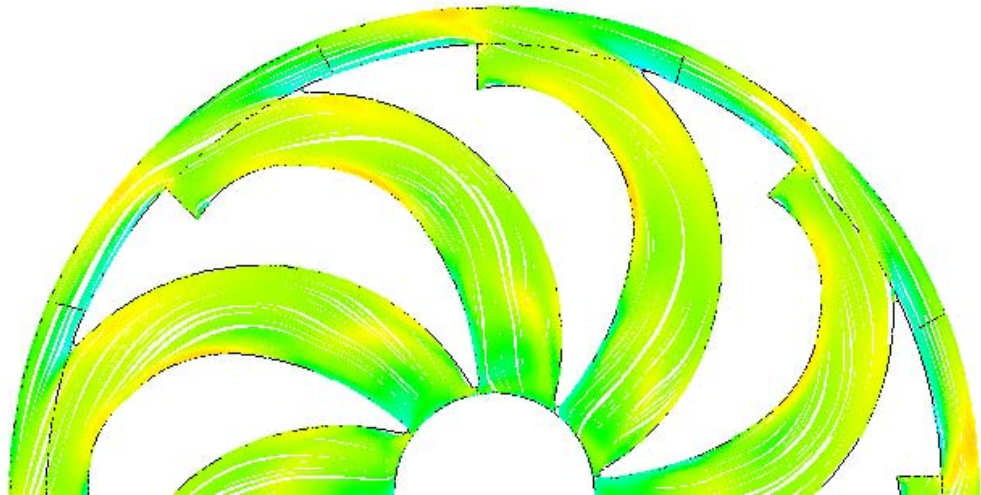
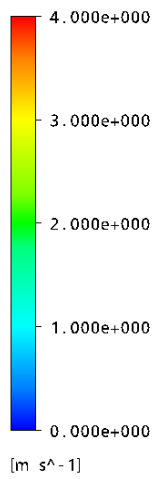
Obr. 6. Poloha řezů 1 a 2. Hydraulika CUD4-7.1

3.1 Čerpadlo 150CHM

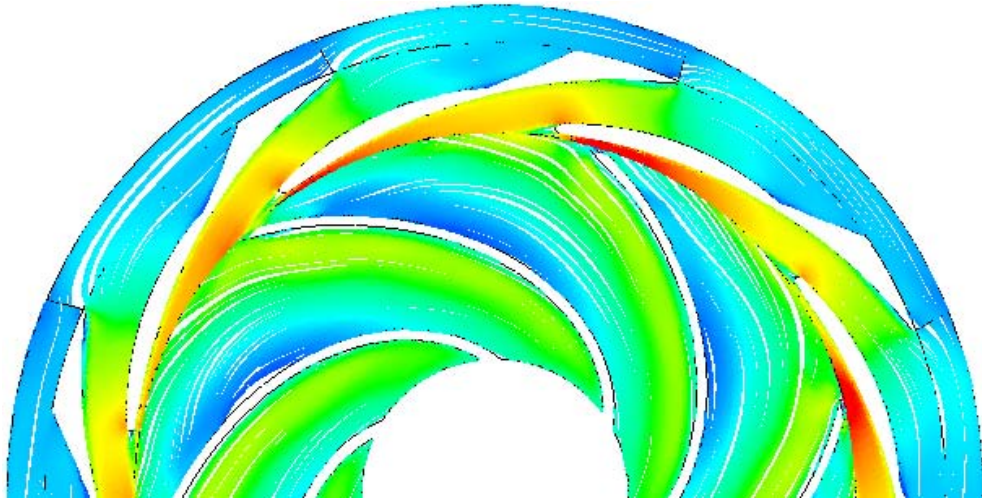
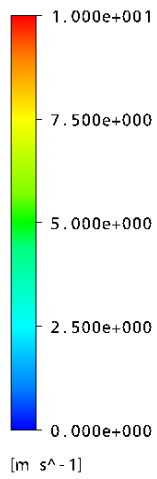
U tohoto čerpadla jsou analyzovány otáčky $n = 1500$ ot./min a uvažovaný provozní rozsah je 20.68 - 64.61 l/s při optimálním průtoku 41.9 l/s. Maximální hydraulická účinnost stupně (obr. 9) je v turbínovém režimu 84.8%, což je výrazně méně, než maximální hydraulická účinnost středního stupně čerpadla CUD4-7.1.

Pro vyhodnocení proudových poměrů v interiéru čerpadla byly opět definovány dva řezy kolmé na osu rotace; jeden z nich leží ve střední rovině výstupu z oběžného kola a vstupu do rozváděcí části statoru a jeden ve střední rovině převáděcí části statoru (obr. 10). Na obrázku 11 jsou ukázány proudnice relativní rychlosti v řezech 1 a 2 pro turbínový provoz, $Q = 46.52$ l/s (v blízkosti optima). Obrázek 12 ukazuje povrchové proudnice na hydraulickém povrchu statoru pro stejný provoz. V levé části obrázku je viditelné malé globální odtržení při natékání odtokové hrany převáděcí lopatky a rozsáhlé globální odtržení za náběžnou hranou převáděcí lopatky. V pravé části obrázku je zřetelné rozsáhlé globální odtržení při natékání tupé odtokové hrany rozváděcí lopatky. Toto "nesladění" lopatkových mříží statoru a tvar odtokové hrany rozváděcí lopatky jsou pravděpodobně hlavní příčinou nízké hydraulické účinnosti stupně čerpadla 150CHM v turbínovém provozu.

Velocity
(StreamlineS Figure 1)

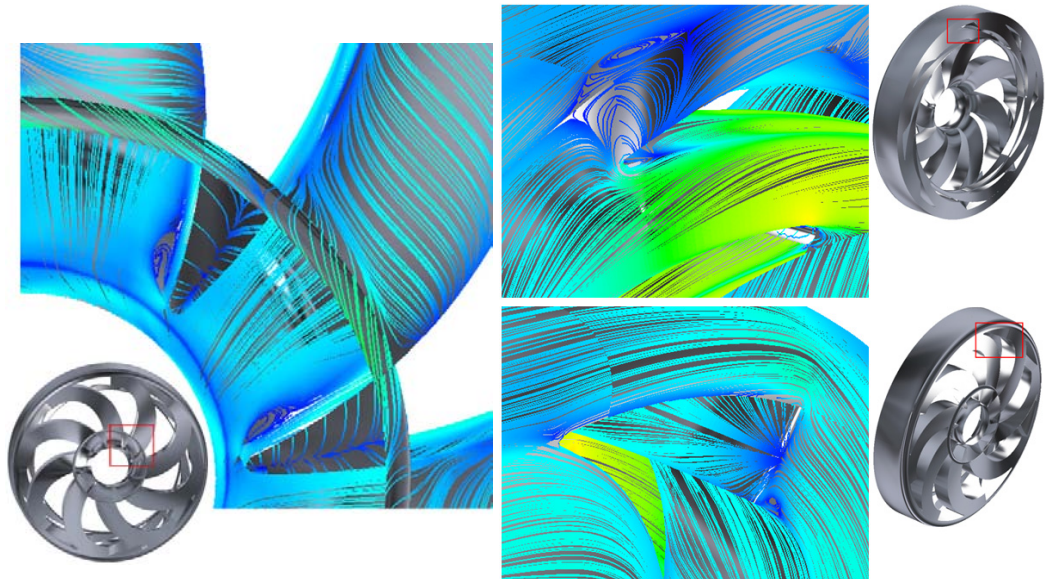
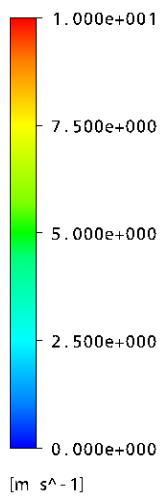


Velocity
(StreamlineR)



Obr. 7. Proudnicе relativní rychlosti v řezech 1 a 2. Hydraulika CUD4-7.1.
Turbínový režim, Q=15.75 l/s

Velocity
(StreamlineR)



Obr. 8. Povrchové proudnicе. Stator CUD4-7.1. Turbínový režim, Q=15.75 l/s

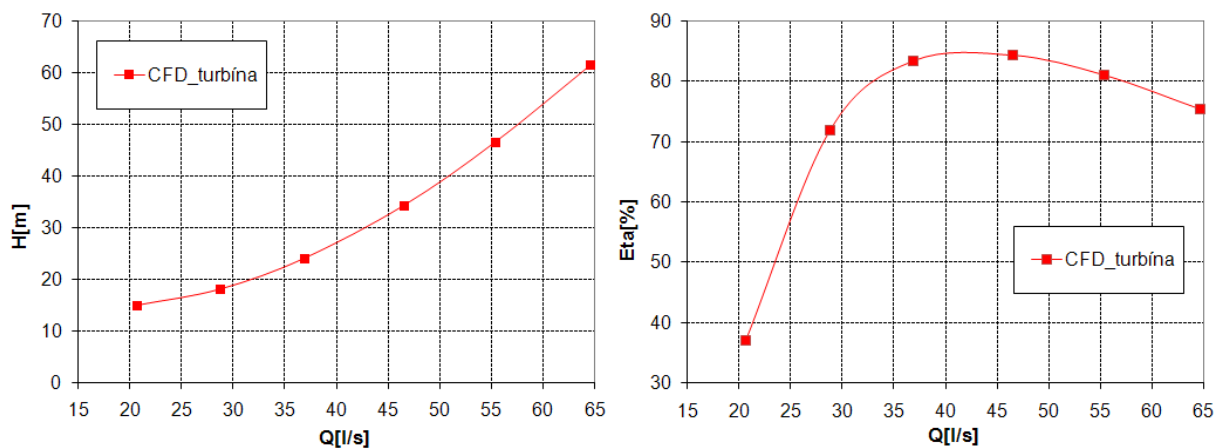
Vzhledem k tomu, že v případě čerpadla 150CHM bylo provedeno v SIGMA VVÚ s.r.o. unikátní měření proudových polí ve statoru pomocí metody LDA (bohužel jen v čerpadlovém režimu), bylo možné porovnat výsledky CFD analýzy s tímto měřením, zejména v kritických oblastech, kde dochází k odtržení proudu. Obrázky 13 - 14 ukazují velmi dobrou shodu výpočtu odtržení na převáděcí lopatce statoru v čerpadlovém režimu (průtok v blízkosti optima) s vizualizací výsledků měření ([3]).

4. Závěr

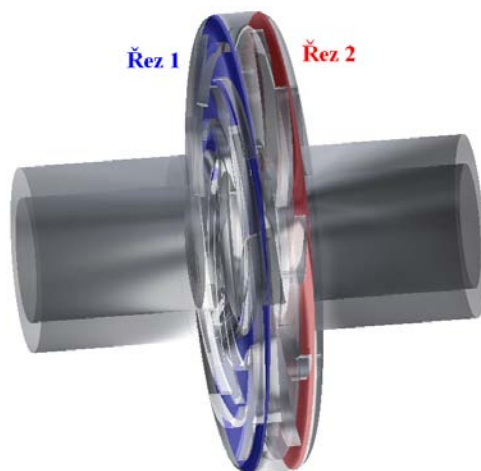
Tato práce potvrzuje, že článkové čerpadlo moderní koncepce může dosahovat v turbínovém režimu velmi vysoké účinnosti, a to i bez potřeby nákladných úprav vyrobených dílů. Výhodná se jeví především koncepce s kanálovým státorem, u které dochází k redukci rozsáhlého odtržení v oblasti, kde rozváděcí část kanálu přechází v převáděcí část. Z hlediska provozu v mimooptimálních režimech by bylo vhodné upravit tvar odtokové hrany lopatky oběžného kola, popř. u koncepce s lopatkovým státorem i tvar odtokové hrany rozváděcí lopatky.

Poděkování

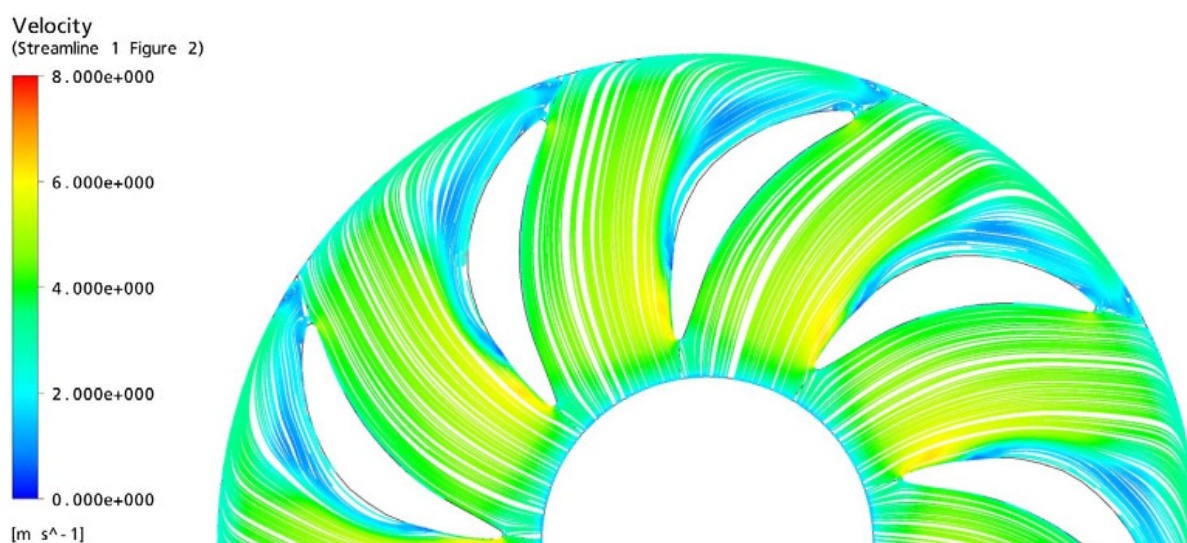
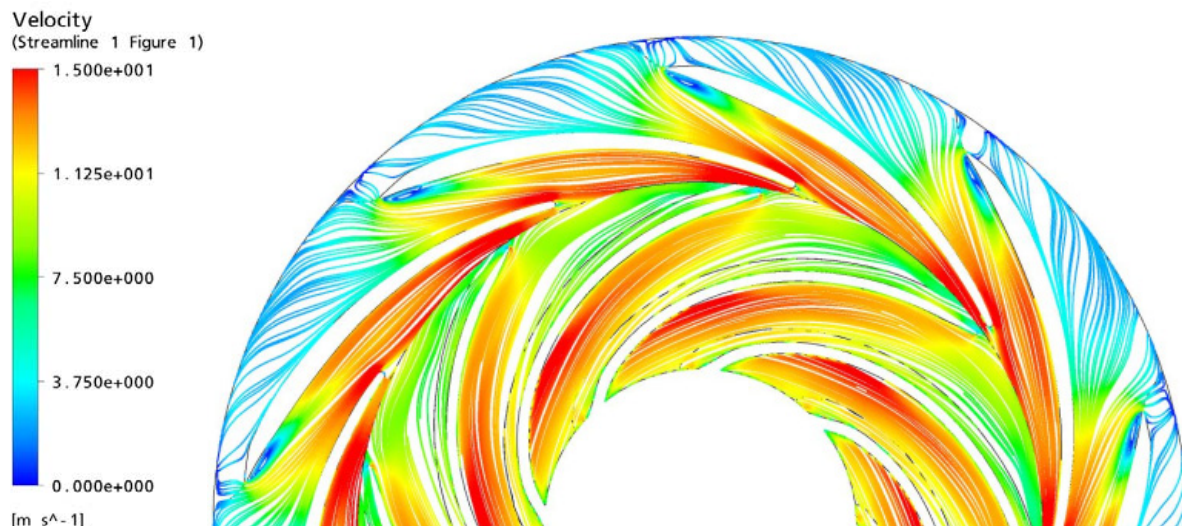
Tato práce vznikla v rámci grantů FT-TA3/160 a FT-TA5/054 Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky.



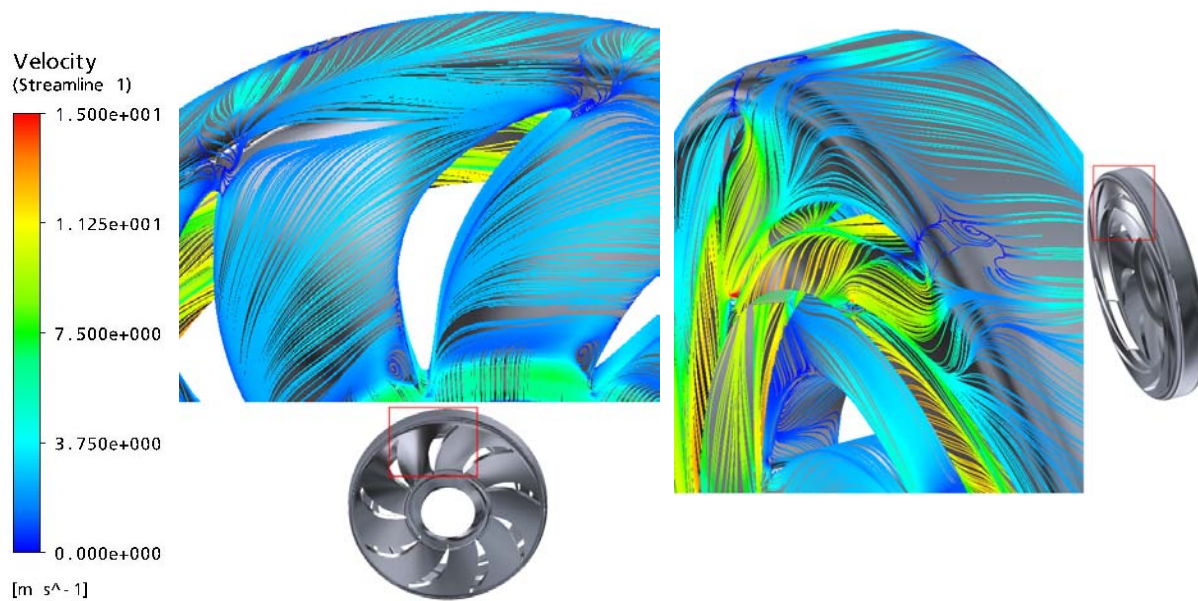
Obr. 9. Spočtená dopravní výška a hydraulická účinnost v turbínovém režimu. Hydraulika 150CHM, 1500 ot/min



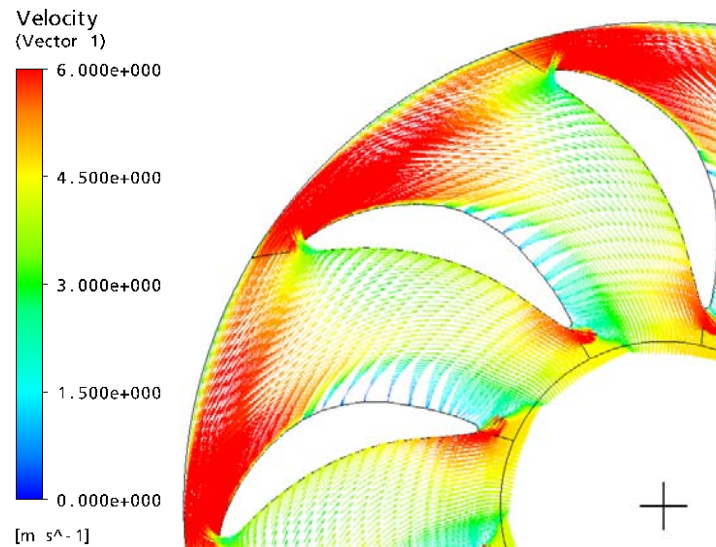
Obr. 10. Řezy středním stupněm kolmé na osu rotace. Hydraulika 150CHM



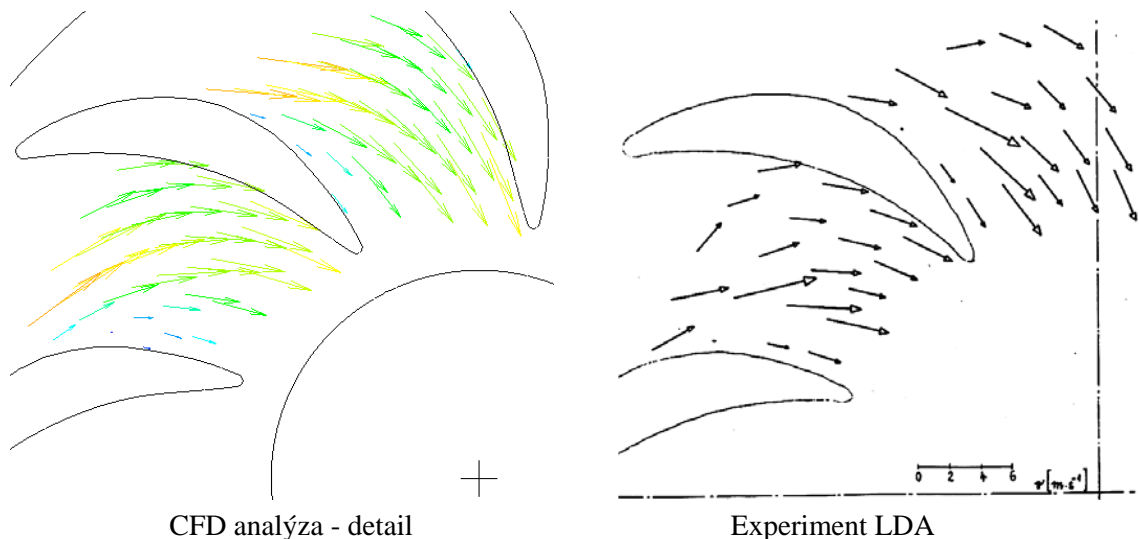
Obr. 11. Proudnice relativní rychlosti v řezech 1 a 2.
Hydraulika 150CHM. Turbínový režim, $Q = 46.52$ l/s



Obr. 12. Povrchové proudnice. Stator 150CHM. Turbínový režim, $Q = 46.52$ l/s



Obr. 13. Vektory rychlosti v řezu 2. Stator 150CHM. Čerpadlový provoz, $Q = 33.7$ l/s



Obr. 14. Porovnání spočítaného a naměřeného odtržení ve statoru 150CHM. Čerpadlový provoz, $Q = 33.7$ l/s

Literatura

- [1] Konečný, M., Dřimal, J., Kysela, J.: Role vodních elektráren v normálních i mimořádných provozních stavech. Hydro-Turbo, 2008
- [2] Šoukal, J.: Turbínový provoz odstředivých čerpadel s dvoustupovými oběžnými koly. ČPA SIGMA, 2-3/1988, s. 9-14
- [3] Šoukal, J.: Vazké proudění ve statoru odstředivého čerpadla. Kandidátská disertační práce, SVVÚ Praha, 1991
- [4] Šoukal, J., Hrachovec, V.: Zkušenosti z provozu turbín na bázi čerpadel v MVE. Hydro-Turbo, 1995
- [5] Šoukal, J.: Charakteristiky spirální čerpadlové turbíny TC-250-KIDP. Výsledky grantového projektu "Výzkum a vývoj inteligentního systému rekuperace energie", Lutín, 2006
- [6] Janda, V., Haluza, M.: Využití článkového čerpadla v turbínovém provozu. Výsledky grantového projektu "Výzkum a vývoj inteligentního systému rekuperace energie", VUT Brno, 2006
- [7] Sedlář, M., Příhoda, J.: Investigation of Flow Phenomena in Curved Channels of Rectangular Cross-Section. Eng. Mechanics, vol. 14, 2007, pp. 387-397