

## Oponentský posudek disertační práce

Ing. Prokopa Moravce  
s názvem

*„Tvarová optimalizace průtočných částí hydraulických strojů“*

- Doktorand: Ing. Prokop Moravec - VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav
- Školitel: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. – VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav
- Oponent: doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D. – VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Posudek byl zpracován na základě dopisu doc. Ing. Jaroslava Katolického, Ph.D., děkana FSI VUT v Brně ze dne 28. 8. 2020.

### Aktuálnost tématu disertační práce

Disertační práce Ing. Moravce je zaměřena na návrh optimalizačních postupů vedoucích ke tvarové optimalizaci lopatky radiálního oběžného kola. Cílem optimalizace je zvýšení hydraulické účinnosti a dopravní výšky čerpadla, zvoleným nástrojem pak pokročilé simulační metody a aplikace optimalizačního algoritmu „Particle swarm“ spolu s Paretovou analýzou.

**Téma práce souvisí s aktuálními požadavky praxe na efektivní transformaci energie v hydraulických strojích**, což se odráží v dosahovaných hydraulických parametrech čerpadel, jejich účinnosti, stabilitě H-Q charakteristiky, dobrých kavitačních vlastnostech, spolehlivosti provozu. V současnosti se optimalizace využívá již ve většině odvětví díky snaze maximálně zefektivnit procesy či výrobu. V oblasti návrhu a analýzy hydraulických strojů jsou hledána nová řešení, která aplikují pokročilé výpočetní a optimalizační metody a také poznatky a zkušenosti z experimentálního výzkumu. To vše je umožněno rychlým rozvojem výpočetní techniky, která umožňuje realizovat numerické řešení praktických úloh optimalizačními metodami v relativně krátkém čase.

### Splnění stanoveného cíle

Konečným cílem disertační práce bylo vypracovat ucelenou metodiku optimalizace tvaru lopatky oběžného kola radiálního čerpadla a ověřit ji na konkrétním příkladě dvou odlišných typů oběžných kol. V prvním případě byla optimalizace zaměřena na oběžné kolo čerpadlové turbíny navržené v rámci grantu TH01020982 s názvem „Zefektivnění akumulace energie a zajištění stability rozvodné sítě rozšířením provozního pásma přečerpávacích vodních elektráren“, druhým příkladem byla optimalizace radiálního oběžného kola čerpadla s nízkou hodnotou rychloběžnosti. Výsledné návrhy byly následně podrobeny CFD analýze, která umožnila vyhodnotit přínosy i případné nedostatky optimalizace. V případě čerpadlové turbíny byly výsledky CFD simulací částečně porovnány s experimentálními daty z měření ČKD Blansko Engineering.

**Z průběhu řešení i výstupů práce lze konstatovat, že definované cíle byly splněny.** Doktorand propojil pomocí programovacího jazyka GNU Octave zvolený optimalizační

algoritmus se simulačními nástroji v komerčním prostředí ANSYS. Vytvořil postup, který využívá dávkové spouštění programů a proces optimalizace tak efektivně automatizuje.

### Postup řešení, výsledky disertační práce a konkrétní přínos doktoranda

Disertační práce je rozdělena do šesti tematických částí. Doktorand v první části disertace zpracoval dostatečně široký přehled současného stavu tvarové optimalizace lopatkových strojů s četnými odkazy na výsledky autorů, kteří se řešenou problematikou zabývají. Kromě informací získaných rešerší zúročil také dlouholeté zkušenosti školícího pracoviště.

V další kapitole zpracoval potřebná teoretická východiska pro vlastní práci. Pro optimalizaci vybral jako vhodnou matematickou optimalizační metodu „Particle swarm“ a její modifikaci pro optimalizaci více proměnných. Pro testování zvoleného algoritmu použil Ackleyovu funkci a specifikoval parametry a podmínky ovlivňující proces optimalizace.

V kapitole 3 se doktorand zaměřil na návrh meridiálního řezu a prostorového tvaru lopatky, při kterém aplikoval různé výpočtové metody, založené na hydrodynamické podobnosti a předpokladu 1D proudění v oběžném kole. Postup byl pak použit pro návrh základní geometrie kola čerpadlové turbíny a čerpadla s nízkou rychloběžností.

V následující části je popsána tvorba optimalizačního postupu, který zahrnuje a s využitím programovacího jazyka v prostředí MATLAB logicky propojuje několik programů, které tvoří plynulý proces od návrhu základní geometrie na základě hydrodynamické podobnosti, přes jeho optimalizaci pomocí MOPSO, vytvoření geometrie a výpočtové sítě pro numerický výpočet, 3D CFD modelování proudění v oběžném kole až po vyhodnocení proudového pole a charakteristik pro každý navrhovaný tvar lopatky.

Kapitola 5 a 6 je věnována dvěma praktickým aplikacím, a to tvarové optimalizaci lopatky oběžného kola výše zmíněné čerpadlové turbíny a kola radiálního čerpadla s nízkou hodnotou rychloběžnosti. V prvním případě jsou posuzovány 3 varianty tvaru lopatky A, B, C, lišící se délkou lopatky a průběhem úhlu lopatky po její délce. Tvar A, který je výsledkem odlišného optimalizačního postupu v rámci grantu TH01020982, byl již realizován formou modelu a jeho charakteristiky byly změřeny, což umožnilo částečnou validaci výsledků numerického modelování s ohledem na skutečnost, že výpočetní model neumožnil zohlednit objemové a diskové ztráty. Při zahrnutí těchto ztrát by byly dosahované hodnoty dopravní výšky a účinnosti ještě nižší. Jako hydraulicky nejvhodnější lze hodnotit návrh s označením C, u kterého je navržen průběh úhlu B po délce lopatky s inflexním bodem, v souladu s doporučením Gülicha.

Příklad radiálního kola s objemovými otáčkami  $n_q = 10$  neposkytuje velký prostor pro tvarovou optimalizaci lopatky, což je také konstatováno v závěru této části. Přesto jsou poznatky získané v této druhé praktické aplikaci cenné.

Lze konstatovat, že doktorand zvolil vhodné metody řešení pro dosažení cílů své disertační práce. Práce je původní a přináší konkrétní poznatky, postupy a metody pro tvarování průtočných částí hydraulických strojů, které mohou být využity v praxi.

### Význam pro praxi a rozvoj vědního oboru

Vědecký přínos disertační práce lze spatřovat v užití nových optimalizačních metod při návrhu tvaru lopatky, který výrazně ovlivňuje charakter proudění v kanálech oběžného kola, a tím dosahované hydraulické parametry. K tomu bylo potřeba navrhnout efektivní metodiku pro spojení nově navržených postupů s komerčními programy.

Metody a výpočetní postupy uvedené v disertační práci jsou využitelné v praxi. K dalším přínosům patří závěry analýz získaných z numerického modelování proudění. Využití CFD programů přispívá k porozumění zkoumaných dějů a získání hodnot zkoumaných veličin v místech, kde nelze realizovat experimentální měření.

#### Formální úprava a jazyková úroveň práce

Předložená disertační práce obsahuje 171 stran textu. Je členěna velmi přehledně do šesti kapitol, obsahuje odkaz na 101 informačních zdrojů, což více než dostatečně pokrývá řešenou problematiku. Ve třech uvedených publikacích je doktorand prvním autorem, v dalších spoluautorem.

Práce je napsána v anglickém jazyce, text je přehledný a srozumitelný, doprovázen řadou obrázků a grafů. Jednotlivá grafická vyhodnocení jdou podrobně popsána a vysvětlena, v závěru hlavních kapitol je vždy provedeno shrnutí a zhodnocení výsledků.

Nemám výhrady k obsahové ani formální stránce práce, obojí je na velmi dobré úrovni.

#### Otázky k rozpravě:

- Rychloběžnost  $n_b$  lze odvodit na základě Eulerova a Strouhalova kritéria HD podobnosti, a je tedy bezrozměrná, což lze potvrdit i rozměrovou analýzou vztahu 3.7. Mohl byste vztah vycházející z těchto kritérií uvést? Jaká další kritéria HD podobnosti jsou v oblasti hydraulických strojů významná?
- Bylo by možné navrženou metodiku také aplikovat pro návrh lopatky rozvaděče? Je vhodné ji v tomto směru dále rozpracovat?
- Je možné souběžně optimalizovat tvar lopatky oběžného kola a rozvaděče a vyhodnotit vliv realizovaných změn tvaru ploch na proudění v obou částech čerpadla a jejich vzájemnou interakci?
- Paretovo pravidlo má časté uplatnění v ekonomice: 80% zisku vytváří 20% produktů. Jak by mohlo být jeho znění formulováno při optimalizaci tvaru oběžného kola?
- Pro tvarovou optimalizaci nabízí ANSYS CFD Adjoint solver. Byl také tento optimalizační nástroj přes zmíněná omezení v rámci této práce testován?
- Správná funkce optimalizačního algoritmu PSO je podmíněna vhodným výběrem váhy  $\omega$  a parametrů  $c_1$ ,  $c_2$ , jejichž hodnoty by se měly pohybovat v rozsahu doporučeného intervalu, který je poměrně široký. Byl testován vliv těchto parametrů, např. krajních hodnot intervalu?

#### Vyjádření k tezí disertační práce

Předložené teze disertační práce o rozsahu 35 stran mají požadovanou strukturu a shrnují poznatky a výstupy dosažené v průběhu jejího řešení.

#### Závěr:

Téma předložené disertační práce Ing. Prokopa Moravce souvisí s aktuální problematikou optimalizace průtočných částí hydraulických strojů. Doktorand zvolil ke své práci vhodné

metody a postupy a dokázal je účelně aplikovat. Prokázal, že má předpoklady pro systematickou vědeckou práci a dosáhl konkrétních stanovených cílů. Získané poznatky jsou původní a jsou přínosem pro vědní obor i praxi. Práce poskytuje prostor pro další navazující výzkumnou činnost.

Stanovené cíle disertační práce byly dosaženy, práce splňuje požadavky na doktorskou práci ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb., doporučuji ji k obhajobě a po jejím úspěšném vykonání navrhuji udělení vědecko-akademické hodnosti Ph.D.

Ostrava, 27. 10. 2020

doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava