

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV ENERGETIKY

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

**TVAROVÁ MODIFIKACE ROZVÁDĚCÍ
LOPATKY KONCOVÝCH STUPŇŮ PARNÍCH
TURBÍN**

Ing. Aleš Macálka

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Energetické stroje a zařízení

Školitel: *prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

červen 2018

Název anglicky: Shape Modifications of the Nozzle in Last Stage Steam Turbine

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu Energetiky, Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: *Ing. Aleš Macálka*
Ústav Energetiky, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6

Školitel: *prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.*
Ústav Energetiky, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07 Praha 6

Oponenti:
.....
.....
.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.
v zasedací místnosti č., Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4,
Praha 6
před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Energetické
stroje a zařízení.
S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

.....
předseda oborové rady oboru
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

Resumé	2
Seznam použitého značení	4
1 Přehled současného stavu problematiky	5
1.1 Validace numerických metod v oblasti točivých strojů.....	5
1.2 Výpočty nízkotlakých dílů parních turbín	6
1.3 Optimalizace točivých strojů.....	7
1.4 Nenávrhové režimy nízkotlakých parních turbín	8
2 Cíle disertační práce.....	9
3 Validace 2D CFD modelu s experimentem	10
4 Tvarové modifikace RL posledního NT stupně	11
4.1 Parametrizace rozváděcí lopatky	14
4.2 Postup tvarování rozváděcí lopatky.....	14
4.3 Výsledky tvarové modifikace.....	16
5 Aerodynamická analýza NT dílu s RL „ORIG“ a „MODIF“	18
6 Závěr	22
Seznam literatury a informačních zdrojů	24
Publikace autora související s disertační prací.....	28
Vybrané publikace autora přímo nesouvisející s disertační prací	29

Resumé

Tato práce se zabývá výpočetním modelováním nízkotlakých (NT) částí parních turbín (PT) s výstupním tělesem. Geometrický model vychází z testovacího úvodního aerodynamického návrhu NT turbíny. Cílem práce je jednak vyvinout metodiku pro optimalizace posledních NT turbínových stupňů zohledňující různé provozní stavy, při kterých by mohla být turbína nasazena, a dále provést analýzu výsledků této metodiky.

Pro validaci numerického modelu bylo využito porovnání s experimentálními daty získanými v aerodynamickém tunelu na patním profilu NT oběžné lopatky (OL). Porovnáván byl ztrátový součinitel s výsledky pneumatických měření a také charakter proudového pole s údaji z optického měření.

Na základě geometrie úvodního modelu NT části PT s radiálním difuzorem a výstupním tělesem jsem provedl aerodynamickou analýzu zahrnující obvodové nesymetrie proudového pole za oběžnými lopatkami, které vznikají v radiálním difusoru a ve výstupním tělese. (Tato část je podrobně popsána v disertační práci)

V další části práce byly provedeny tvarové modifikace rozváděcí lopatky (RL) posledního NT stupně tangenciálním náklonem, axiálním náklonem a úpravou patní okrajové plochy s cílem zvýšit účinnost turbíny. Pro řízení tvarových modifikací RL byla použita metoda „Design of Experiment“ (DOE), která efektivně prohledává a mapuje zadaný optimalizační prostor.

Tento modifikovaný tvar RL byl porovnán s úvodním tvarem RL pro různé provozní stavy a podrobně analyzován.

Tato práce obsahuje řadu návrhů a postupů pro tvarovou optimalizaci točivých strojů a jejich analýzu.

Resumé

This work deals with computational modeling of low pressure parts of steam turbines with exhaust hood. The geometric model is based on the testing aerodynamic design of the low pressure turbine. The aim of the work was to develop a methodology for optimization of the last low pressure turbine stages with regard to the different operating states where the turbine could be used and the subsequent analysis of the results.

For the validation of the numerical model, a comparison was made with the experiment on the root profile of bucket blade in the aerodynamic tunnel, where I compared the loss coefficient and the character of the flow field with the optical measurement. (This part is described in full version of thesis)

On the basis of the geometry of the low pressure part of the steam turbine with the radial diffuser and the exhaust hood, I performed an aerodynamic analysis, including the non-uniformity of the flow field behind the last bucket which develops in radial diffuser and the exhaust hood. (This part is described in full version of thesis)

In the following section, the shaping of the nozzle of the last stage was performed by compound lean, axial sweep and hub end-wall with goal to increase the efficiency of the turbine. The "Design of Experiment" method (DOE) was used to control nozzle shape modifications, which is able to search and map the specified optimization space.

This modified nozzle shape was compared to the initial nozzle shape for different operating states and analyzed in detail.

A series of recommendations and guidelines for the CFD modelling of steam turbine exhaust hood flows based on this work are supplied.

Seznam použitého značení

Latinská abeceda:

C	[m.s ⁻¹]	absolutní rychlost
c _p	[1]	součinitel zvýšení tlaku
i	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná entalpie
m	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní průtok
M	[1]	Machovo číslo
M _k	[Nm]	kroutcí moment
n	[min ⁻¹]	otáčky
p	[Pa]	tlak
R	[m]	poloměr lopatek
Theta	[°]	obvodový úhel
U	[m.s ⁻¹]	unášivá rychlost
W	[m.s ⁻¹]	relativní rychlost
y ⁺	[1]	bezrozměrná vzdálenost od stěny

Řecká abeceda:

α	[°]	úhel absolutní rychlosti
β	[°]	úhel relativní rychlosti
γ	[°]	úhel nastavení lopatek
ζ	[%]	ztrátový součinitel kinetické energie
η	[%]	účinnost
Δ	[1]	rozdíl parametrů mezi variantami MODIF a ORIG

Indexy:

0,1,2,3,4,5	poloha rovin
is	isoentropický stav
c	celkový stav
s	statický stav
p	pata lopatky
š	špička lopatky

1 Přehled současného stavu problematiky

V uplynulých letech byly prováděny četné numerické simulace, experimentální měření a teoretické analýzy chování proudu páry a vzniku ztrát v NT dílech parních turbín a ve výstupních tělesech. S ohledem na náplň této práce se tyto simulace dají rozdělit do čtyř hlavních oblastí. První oblast se zabývá validací numerických metod s experimentem v oblasti točivých strojů. Druhá oblast se zabývá numerickými výpočty v NT dílech parních turbín. Třetí oblast je věnována optimalizaci a zlepšování parametrů parních turbín. Poslední čtvrtá oblast se zabývá provozem parních turbín při nenávrhových režimech. Všechny tyto dílčí oblasti jsou spolu provázány a v současné době téměř neexistuje veřejně publikovaná ucelená práce, která by popisovala komplexně tuto problematiku, včetně postupů, jak k ní přistupovat.

1.1 Validace numerických metod v oblasti točivých strojů

V době, kdy ještě nebyla dostupná dostatečně výkonná výpočetní technika, nebylo možné plně využívat numerických metod pro simulace technických problémů. S rostoucím výpočetním výkonem, můžeme provádět stále náročnější numerické simulace, které nám mohou pomoci s detailní pevnostní nebo aerodynamickou analýzou. Pro správné vyřešení náročného technického systému, jakým parní turbíny bezesporu jsou, je nezbytné mít znalosti ve třech oblastech. První oblast je dobrá teoretická znalost točivých strojů, např. 1D přístupy na bázi rychlostních trojúhelníků a ztrátových modelů [1-2]. Druhá oblast je dobrá teoretická i praktická znalost numerických modelů, které je možné efektivně použít v dané problematice [3]. Poslední třetí oblast, která je nedílnou součástí řešení technických problémů je experiment, podle kterého můžeme validovat svůj numerický model. Příklad zdařilé aerodynamické optimalizace malé parní turbíny pomocí experimentu uvedli Gao et al. v publikaci [4], kde snížili ztráty oběžné lopatky natačením a úpravou meridiálního řezu. Dalším příkladem použití experimentálních metod [5] je pokračování v předchozí publikaci, kde se autoři soustředili na modifikaci rozváděcí lopatky pro různé provozní režimy, charakterizované různými úhly náběhu. V oblasti točivých strojů se používá velice často komerční řešič ANSYS CFX [6], který obsahuje vhodné modely pro proudění za rotace a výpočty v něm provedené mají dobrou shodu s experimentem. Autoři Guillot, Wing et al. se zabývali modifikací deflektoru difuzoru [7], kde se jim podařilo snížit ztráty v difuzoru s dobrou shodou numerického řešení a měření. Zajímavých výsledků dosáhli Zhou et al. [8] v porovnání numerického modelu a měření radiálního difuzoru

s výstupním hrdlem, kde je zřejmé dobré zachycení obvodové nesymetrie v difuzoru numerickým modelem. Dále tato práce ukazuje dobrou shodu proudového pole z numerické simulace a měření pomocí PIV. Téměř všechny numerické simulace v oblasti NT parních turbín jsou porovnány s experimenty na zmenšených a zjednodušených modelech. Důvodem je nedostatek experimentálních výsledků na reálných parních turbínách velkého výkonu. Nejrozsáhlejší experimenty na reálných PT velkého výkonu provedli Kolovratník, Hoznedl et al. Tyto unikátní výsledky měření jsou porovnány s několika numerickými výpočty s velice dobrou shodou. První publikací je aerodynamická analýza proudění v nízkotlaké části turbíny JE Temelín [9] autorů Živného, Macálky et al., kde je porovnáno měření a numerický výpočet s cílem stanovit místa s největším potenciálem pro zvýšení výkonu NT dílu této parní turbíny. Numerický model posledního stupně parní turbíny je velice komplexní, zahrnuje i výstupní těleso, včetně vestaveb a nástavby kondenzátoru. Pro porovnání byly použity hodnoty z bodového měření v tlakových odběrech a z traverzovací roviny za posledním oběžným kolem.

1.2 Výpočty nízkotlakých dílů parních turbín

Vnitřní aerodynamika točivých strojů je velice komplexní technický problém, zejména v posledních NT stupních parních turbín. Proudění je zde nutné řešit jako stlačitelné, turbulentní, popř. přechodové. Proudícím médiem je pára přecházející z oblasti přehřáté do oblasti mokré páry. Detailním porovnáním numerických výpočtů a měření vlhkosti páry na zmenšeném modelu se zabývali autoři Grubel, Schatz et al. [10,11], kde zjistili poměrně velké rozdíly ve výsledcích, zejména vlhkosti, pro různé operační režimy. Dobré shody výsledků měření a numerických výpočtů dosáhli autoři Živný, Macálka et al. v [9]. U parních turbín velkého výkonu (kolem 1000 MW) se obvykle používá radiální difuzor, kterým je pára svedena do kondenzátoru pod turbínu. Toto řešení je výhodné, jelikož snižuje axiální délku difuzoru, což je jedno z hlavních omezení konstrukce výstupního tělesa. Délka rotoru parních turbín velkého výkonu může být 30-40 m a jakékoliv prodloužování difuzoru zvyšuje náklady, váhu a velikost zařízení. Konfigurace s radiálním difuzorem a kondenzátorem pod turbínou vede ke kompaktním rozměrům s axiální délkou pouze dvakrát větší (nebo méně) než je výška poslední oběžné lopatky. Hlavním negativním aspektem této konfigurace je otočení proudu páry z axiálního směru do radiálního, což sebou nese přídavné ztráty (snížení výkonu turbíny) v porovnání s konfigurací s axiálním difuzorem a kondenzátorem vedle turbíny. Pára vystupující z posledního NT stupně má velkou kinetickou složku energie a úkolem výstupního tělesa, které se skládá z difuzoru, výstupního hrdla a nástavby kondenzátoru, je transformace této

složky na energii tlakovou. Největší část kinetické energie je přeměněna na tlakovou v oblasti difuzoru, kde ještě není tak hustá zástavba vyztužovacími prvky, které jsou nezbytné pro zvýšení pevnosti a tuhosti konstrukce.

Výpočet v takto komplexní průtočné části bývá často zjednodušován pomocí různých výpočtových metod. Ukazuje se, že velkým zjednodušením, které není vhodné pro poslední NT stupně s výstupním tělesem je jeden Mixing Plane (MP) mezi výstupem z oběžné lopatky a vstupem do difuzoru. Výrazným zpřesněním numerického modelu je použití několika přechodů MP mezi stacionární a rotační doménou, které dokáží simulovat obvodové nerovnoměrnosti za oběžnou lopatkou [12]. Tato metoda s MP je velice efektivní a rychlá, jelikož šetří velký počet výpočetních buněk. Bohužel větší nepřesnosti se mohou objevit u reálných turbín s velmi dlouhými oběžnými lopatkami posledního stupně, kde jsou velmi vysoké rychlosti na špičkách OL a začínají se výrazněji projevovat nepřesnosti přechodu MP při simulaci rázových vln. Důležitým aspektem numerického modelování výstupních těles je nadbandážová ucpávka, kde dochází k urychlení proudu páry, který směřuje do difuzoru a silně ovlivňuje místo odtržení u deflektoru. Použití metody MP může také zkreslit tento důležitý aspekt, což potvrzuje i práce autorů Meng et al. [13] a [14]. Další efektivní metoda je např. Non-Linear Harmonic Method (NLH), která umožňuje řešit nestacionární úlohy s obvodovou nesymetrií ve výstupním tělese pouze s jednou modelovanou lopatkou v kole [15]. Pomocí této metody NLH zrychlíme výpočet a dosáhneme obvodové nesymetrie v tělese, ale není zde zřejmé, jak moc ovlivníme přesnost dosažených výsledků. Nejpřesnější metodou se zatím ukazuje řešení pomocí modelování celého oběžného kola nebo i více lopatkových segmentů včetně geometrických detailů jako jsou ucpávky, odběry atd. Za jeden z nejkompaktnějších CFD modelů NT dílu s výstupním tělesem lze považovat práci Živného, Macálky et al. [9], kde je modelováno celé poslední oběžné kolo včetně nadbandážové ucpávky, těleso se všemi vyztužovacími prvky a nástavbou kondenzátoru.

1.3 Optimalizace točivých strojů

Točivé stroje jsou konstrukčně složitá zařízení vyžadující přesně tvarované lopatkové kanály pro dosažení maximální účinnosti a výkonu. Z tohoto pohledu je velice náročné tvarově optimalizovat jednotlivé turbínové stupně bez efektivního optimalizačního nástroje a parametrizace jednotlivých lopatek.

V řadě optimalizací se používají evoluční metody (genetické algoritmy), které jsou schopny nalézt globální extrém hledané funkce.

Genetické algoritmy se používají zejména pro optimalizace tvaru difuzorů, kde není velký počet vstupních geometrických parametrů [16-18], nebo u prizmatických lopatek. Genetické algoritmy a jejich modifikace většinou vyžadují poměrně vysoký počet tvarových modifikací, proto se často kombinují s jinými jednoduššími metodami.

Pro 3D optimalizace lopatek a difuzorů se často používají DOE metody, jež umožňují efektivně využívat velký výpočetní výkon a vysoký počet vstupních geometrických parametrů. Příklad použití DOE analýzy s vytvořením metamodelu pomocí Krigingovy interpolace je uveden v článku [19] autorů Macálky et al., kde bylo cílem zvýšení účinnosti posledního stupně parní turbíny velkého výkonu, pomocí tvarování rozváděcí lopatky. Další práce autorů Macálky et al., na téma zvyšování účinnosti parních turbín pomocí DOE analýz je uvedena v [20]. Aplikace DOE metod pro zvyšování účinnosti lze použít na různé úlohy jako jsou kompresorové oběžné kolo [21], nebo difuzorové lopatky [22] kompresoru. Pokud není k dispozici parametrizační nástroj na úrovni geometrie lopatek, je možné využít metodu na přímou změnu výpočetní sítě, která se nazývá morfing [23-25]. Výhody morfingu jsou zrychlení a zjednodušení optimalizačního procesu, jelikož odpadá přesíťování nových tvarových modifikací. Nevýhodou morfingu je malá volnost tvarových změn a zhoršení kvality výpočetní sítě pro větší modifikace. Další alternativou k DOE analýze je Haltonova řada, která byla použita v úloze posledního středotlakého stupně, kde bylo cílem zvýšení součinitele zvýšení tlaku c_p v difuzoru autorů Macálky et al. [26]. Velké množství poznatků o 3D modifikacích lopatkových strojů zpracoval Denton et al. Jednotlivé modifikace jako axiální a tangenciální náklon, natáčení a tvarování patních částí lopatek jsou popsány v [27].

1.4 Nenávrhové režimy nízkotlakých parních turbín

V současnosti je velký tlak na provozování parních turbín v širokém rozsahu provozních režimů, často značně vzdálených od návrhových stavů, tj. při různých nenávrhových režimech. Jelikož vývoj parních turbín je velice nákladná záležitost, je pro výrobce těchto strojů důležité znát celý operační rozsah a použitelnost dané řady turbín pro další energetické celky. Tento operační rozsah je dán především admisními parametry páry, tedy různým tlakem a teplotou před turbínou. Další proměnnou je emisní tlak na výstupu z tělesa turbíny, který je dán tlakem v kondenzátoru. Tento tlak je závislý na konstrukci kondenzátoru a teplotě chladicí vody, která je rozdílná v letních a zimních provozech. Numerické řešení nenávrhových režimů je velice náročné, jelikož potřebujeme simulovat více stupňů najedenou, včetně výstupního tělesa a proudění je poměrně nestacionární, prováděné separací

proudu páry. Problematikou simulací nenávrhových režimů parních turbín se zabývali jako jedni z prvních autoři Megerle et al., kteří ve své práci [28] popisují vliv radiální vůle a geometrie výstupního tělesa na výsledky simulací. Rozbor nenávrhových režimů posledních tří NT stupňů parní turbíny provedl Shao et al. v [29], kde řešil provozní režimy od 10 % do 100 % hmotnostního průtoku. Výsledkem bylo zjištění, že k „ventilačnímu provozu“ se zápornou reakcí dochází přibližně při 30 % hmotnostního průtoku turbínou. Důležitým aspektem numerických simulací nenávrhových režimů je i možnost použití při tvarové optimalizaci lopatkových strojů, kdy můžeme zvyšovat účinnost s ohledem na více provozních režimů. Toto téma v oblasti parních turbín velkého výkonu je poměrně málo publikované. Provozy při nenávrhových režimech mohou být provázány nejen horšími aerodynamickými vlastnostmi, ale zejména pevnostními problémy. U hodně odlehčených stavů je velké riziko asynchronního aerodynamického buzení, které může vést k velkému dynamickému namáhání oběžných lopatek [30]. U hodně přetížených stavů je u dlouhých oběžných lopatek riziko aeroelastického buzení tzv. „flutter“. Lopatkovým flutterem se dlouho zabývá Kielb et al. [31] a Petrie-Repar et al. [32]. V poslední době vznikla poměrně rozsáhlá práce na toto téma ve spolupráci autorů Sláma, Ira, Macálka et al. [33-36], kde je podrobný rozbor chování špičkového profilu oběžné lopatky parní turbíny. Součástí rozboru jsou numerické simulace a porovnání s měřením pro torzní a posuvný pohyb oběžné lopatky.

V současné době téměř neexistují veřejně publikované analýzy vlivu nenávrhových režimů na parametry parních turbín velkého výkonu při úlohách, jejichž cílem je zvýšení účinnosti.

2 Cíle disertační práce

- Zvýšení účinnosti posledního NT stupně parní turbíny tvarovou modifikací rozváděcí lopatky a patní omezující plochy včetně zhodnocení pro různé provozní režimy.
- Vyvinutí efektivní metodiky na zvyšování účinnosti turbínových stupňů pomocí tvarových modifikací lopatek a patní omezující plochy se zhodnocením pro různé provozní režimy
 - Validace numerického modelu s výsledky experimentu.
 - Ověření funkčnosti metodiky zvyšování účinnosti v komplexním modelu celého NT dílu včetně výstupního tělesa.
 - Analýza proudění v NT dílu pro nenávrhové režimy parní turbíny s původní a modifikovanou rozváděcí lopatkou.

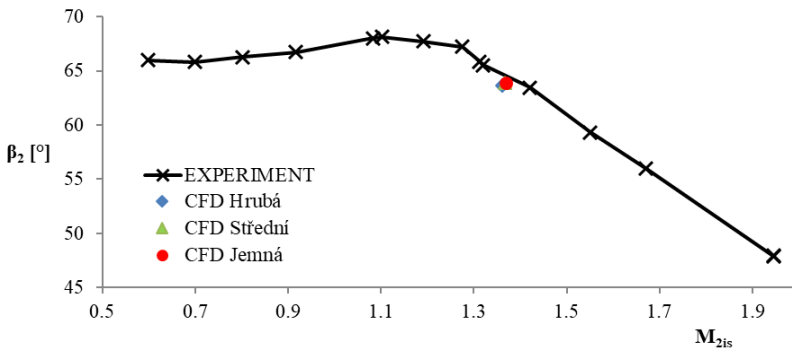
- Analýza asymetrického proudového pole za poslední oběžnou lopatkou.
- Metodická příručka pro správné nastavení CFD modelů při řešení vnitřní aerodynamiky NT stupňů parních turbín.

3 Validace 2D CFD modelu s experimentem

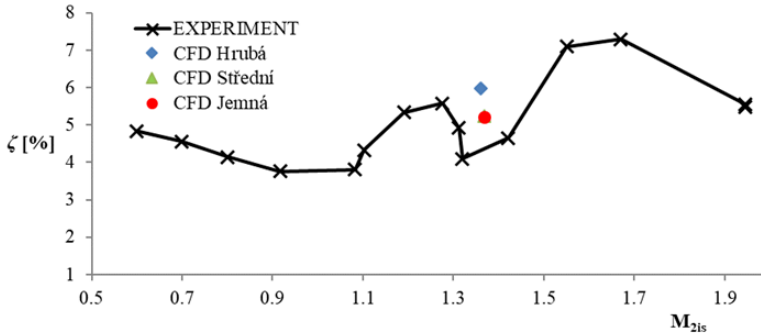
Ve vysokorychlostním aerodynamickém tunelu v Novém Kníně ÚT AVČR byla provedena řada měření lopatkových profilů včetně patního profilu oběžné lopatky [37, 38], která byla použita pro validaci našeho numerického modelu. Optická měření poskytla informace o struktuře proudového pole a rozložení rychlosti podél profilů. Pomocí dat získaných z pneumatických měření byly vyhodnoceny integrální parametry výstupního proudu, ztrátový součinitel kinetické energie ζ a výstupní úhel β_2 .

V této kapitole jsou uvedeny výsledky porovnání měření a numerického výpočtu patního profilu oběžné lopatky. Numerický výpočet je proveden pouze pro provozní stav, který odpovídá návrhovému výstupnímu Machovu číslu M_{2is} . Porovnány jsou integrální parametry výstupního proudu, ztrátový součinitel kinetické energie ζ a výstupní úhel β_2 [39]. Dále je porovnáno proudové pole z optického měření šlívovou metodou a numerické analýzy.

Obrázek 1 zobrazuje porovnání průběhu výstupního úhlu β_2 , který je velice blízko numerickému řešení nominálního stavu pro všechny 3 velikosti výpočetní sítě. Body z numerických výpočtů pro různé výpočetní sítě se téměř překrývají.



Obr. 1: Porovnání výstupního úhlu β_2



Obr. 2: Porovnání ztrátového součinitele kinetické energie ζ

Na obrázku 2 je porovnání ztrátového součinitele kinetické energie ζ s numerickým řešením nominálního stavu pro všechny 3 výpočetní sítě. Numerické řešení pro střední a jemnou výpočetní síť je téměř identické a hodnota ztrátového součinitele se liší od měření o necelé procento, což je při vyšetřování transsonického proudění dobrá shoda. Tato diference může být způsobena nepřesností měření i numerického výpočtu.

4 Tvarové modifikace RL posledního NT stupně

Tato kapitola je věnována 3D modifikaci rozváděcí lopatky posledního stupně při zachování profilů po výšce lopatky. Je zde popsána metodika, kterou lze aplikovat na všechny typy lopatkových strojů. Oběžná lopatka není modifikována, jelikož je nutné brát v úvahu i pevnostní rizika, která jsou spojená s úpravou oběžné lopatky.

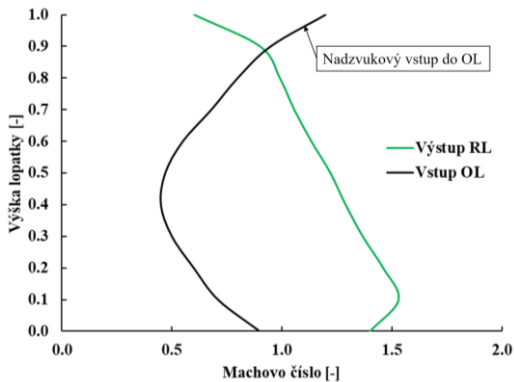
Tvarové modifikace lopatkování s cílem zvýšení účinnosti PT pomocí numerických metod jsou poměrně náročné na výpočetní výkon, jelikož pro dobrý popis tvaru lopatek potřebujeme hodně geometrických parametrů, tzv. parametrizaci. Pro velký počet těchto geometrických parametrů je důležité zvolit efektivní vyhledávací metodu, která se co nejvíce přiblíží globálnímu extrému hledané funkce, a maximálně zrychlit numerickou analýzu, abychom mohli dostatečně přesně prohledat celou žádanou oblast tvarových změn. Na základě předchozí podrobné analýzy NT dílu parní turbíny můžeme dobře odhadnout efektivní metodiku při hledání nejlepšího tvaru rozváděcí lopatky [19, 39].

Při idealizovaném návrhu posledních stupňů s vysokou účinností by mělo být vstupní Machovo číslo po celé výšce oběžné lopatky pod hodnotu

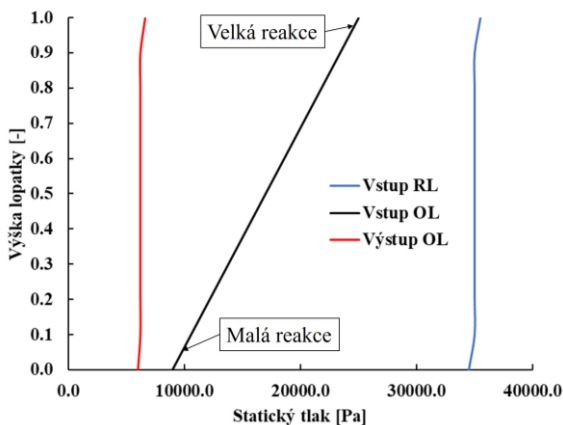
0,8, což je při požadovaných objemových průtocích téměř nemožné. Velké objemové průtoky posledním NT stupněm vyžadují velké průtočné průřezy, tzn. malý poměr patního a špičkového poloměru $R_p/R_{\text{š}}$. Větší poměr $R_p/R_{\text{š}}$ vede ke kratším lopatkám, které se snadněji navrhnou, ale roste ztráta výstupní rychlosti. Menší poměr $R_p/R_{\text{š}}$ vede k delším lopatkám, která mají menší ztrátu výstupní rychlosti, ale zároveň rostou ztráty v lopatkách.

Problematická místa dlouhých oběžných lopatek jsou patní a špičková část na vstupu, kde je velký rozdíl v průběhu tlaku a Machova čísla po výšce lopatky. Na ilustrativním obrázku 3 jsou ukázány typické hodnoty relativního Machova čísla pro dlouhé lopatky. Je zde označeno problematické místo u špičky před oběžnou lopatkou, kde jsou obvykle supersonické rychlosti, které jsou provázeny vysokými ztrátami. Tyto ztráty jsou způsobeny zejména čelní rázovou vlnou, která vzniká před špičkou oběžné lopatky.

Na obrázku 4 jsou průběhy statického tlaku po výšce u typického posledního NT stupně, přičemž vyznačená místa provází vysoké ztráty. Důležitým parametrem při analýze turbínových stupňů je reakce, která je definována pro jednoduchost na základě poměru tlakového spádu na oběžné lopatce vůči spádu na celém stupni. Takto můžeme kvantifikovat malou reakci na patě a velkou reakci na špičce, která je z obrázku 4 patrná. Jedním z cílů této práce je zvýšení účinnosti PT, čehož můžeme docílit vhodným tvarováním RL, v jehož důsledku dojde k vyrovnání průběhu reakce po výšce lopatky. Tzn. zvýšení reakce na patě a snížení reakce na špičce, což by mělo vést i k vyrovnání rychlostí a snížení ztrát v PT. V případě posledního NT stupně je to vždy kompromis mezi ztrátami v lopatkování a ztrátou výstupní rychlosti.



Obr. 3: Rel. Machovo číslo po výšce lopatky



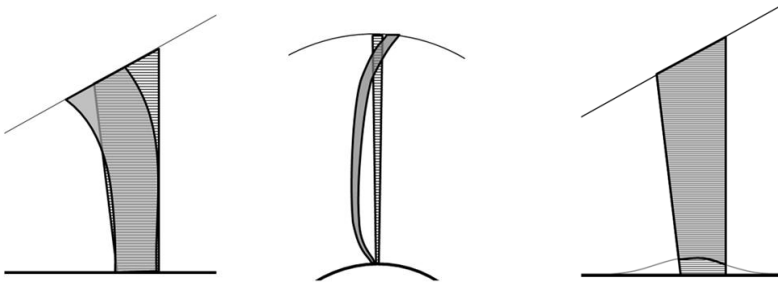
Obr. 4: Statický tlak po normované výšce lopatky

Pro vylepšení průběhu reakce a zvýšení účinnosti NT dílu PT máme několik možností, jak toho docílit.

- Axiální náklon lopatky (Blade sweep) – Tato metoda je založena na axiálním náklonu RL proti směru proudu, čímž směrem ke špičce lopatek zvětšujeme axiální vzdálenost mezi RL a OL. Pozitivní důsledek větší axiální vzdálenosti RL od OL je menší erozní namáhání OL. Nicméně to také může vést ke zvýšení vlhkosti v této oblasti, tím ke zvýšení rychlosti u stěny a větším ztrátám. Proto je nutné si uvědomit všechny aspekty této tvarové modifikace a vhodně ji použít, např. v kombinaci s jinou metodou.
- Tangenciální náklon lopatky (Blade lean) – Modifikace náklonem v tangenciálním směru je často používaná a její princip spočívá hlavně ve zvýšení tlaku u paty a snížení tlaku u špičky za rozváděcí lopatkou. To vede k vyrovnání reakce stupně a zvýšení účinnosti.
- Natáčení lopatek (Blade twisting) – Natáčení lopatek upravuje průtočné množství směrem ke středu lopatky, kde předpokládáme nejvyšší účinnost, jelikož je zde nejmenší ovlivnění okrajovými ztrátami. Při této metodě je dobré modifikovat jak rozváděcí, tak oběžnou lopatku, protože se silně mění výstupní úhly proudu, které mezi sebou musí u jednotlivých lopatek spolupracovat. Tato metoda při optimalizaci RL nebyla použita, jelikož OL je fixována z pevnostních důvodů.
- Modifikace patní okrajové plochy (Hub profiling) – Metoda modifikace patní okrajové plochy upravuje proudnice v této oblasti a vhodným tvarováním může přispět ke zvýšení patní reakce a nasměrování proudu od okrajové části.

4.1 Parametrizace rozváděcí lopatky

Pro parametrizaci lopatky v této práci je použit program BladeShaper, vyvinutý ve společnosti Doosan Škoda Power, který je založen na Beziérových křivkách. Rozváděcí lopatka je modifikována pomocí kombinace tří metod, vhodných pro poslední turbínové NT stupně, kdy je zafixovaný tvar oběžné lopatky. První metodou je axiální náklon RL, který umožňuje pohyb lopatky v osové směru (obrázek 5a) a je definován pomocí 6 parametrů. Druhou metodou je tangenciální náklon RL, který umožňuje náklon v obvodovém směru (obrázek 5b) a je definován pomocí 7 parametrů. Třetí metodou je modifikace patní okrajové plochy RL (obrázek 5c), který je definován pomocí 4 parametrů. Celkem je použito 17 vstupních parametrů modifikujících tvar RL.



a) Axiální náklon b) Tangenciální náklon c) Tvarování patní křivky

Obr. 5: Schematické znázornění metod tvarových modifikací rozváděcí lopatky

4.2 Postup tvarování rozváděcí lopatky

Dlouhé lopatky turbínových stupňů jsou složeny z geometricky složitých ploch, jejichž parametrizace není jednoduchá a vyznačuje se relativně velkým počtem parametrů. Numerické simulace jsou poměrně náročné na výpočetní výkon a výpočetní čas, který se na výkonném hardware pohybuje v řádech jednotek až desítek hodin. Při hledání nových turbínových lopatek s vyšší účinností se tedy kombinuje velký počet vstupních parametrů a omezený počet kroků (tvarových modifikací), které jsou potřeba k dosažení „globálního optima“.

Dalším významným pohledem ovlivňující volbu optimalizační metody je forma výsledků, kterou chceme dosáhnout. Tzn. může to být pouze jeden výsledný tvar RL, který je výsledkem hledání např. gradientních metod

s přesně definovanou cílovou funkcí. Pokud ale chceme mít hlubší představu o tom, co se ve vyšetřované oblasti děje, nebo nemáme přesně definovanou cílovou funkci, je lepší použít metod typu DOE (Design of Experiment), které rovnoměrně umísťují jednotlivé body do vyšetřované oblasti [19-23, 39]. Tato DOE metoda umožňuje vytvoření, tzv. „metamodelu“, s nímž můžeme efektivně pracovat. Další velkou výhodou DOE analýzy je, že můžeme jednotlivé body (tvarové modifikace) řešit paralelně, jelikož jsou všechny vygenerovány už na úvod analýzy a nepotřebují být řešeny postupně.

Na obrázku 6 je popsán postup tvarování RL, jak probíhaly jednotlivé kroky od definování vstupních parametrů až po nalezení finální varianty MODIF. Všechny tyto kroky byly zautomatizovány pomocí bash skriptů.

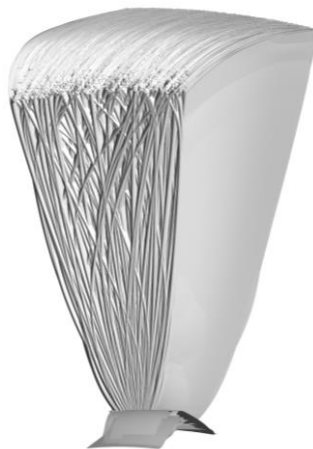


Obr. 6: Postup tvarování RL

Prvním krokem bylo stanovení rozsahu všech sedmnácti vstupních parametrů, které byly nastaveny na maximální rozsah. Tento rozsah je dán vyrobiteľností rozváděcí lopatky.

Druhým krokem je generace DOE matice na základě rozsahů definovaných v prvním kroku. V našem případě byla použita DOE metoda „Optimal Space Filling“ (OSF), která je součástí optimalizačního balíčku DesignXplorer. Tato metoda nám umožňuje volbu vlastního počtu tvarových modifikací „run“, kterou jsme nastavili na 500. To znamená, že bylo spočteno 500 CFD výpočtů, každý s jiným tvarem RL posledního stupně (obrázek 7). Tato metoda OSF vychází z metody „Latin Hypercube Sampling“ (LHS). Detailní popis dalších kroků je uveden v disertační práci.

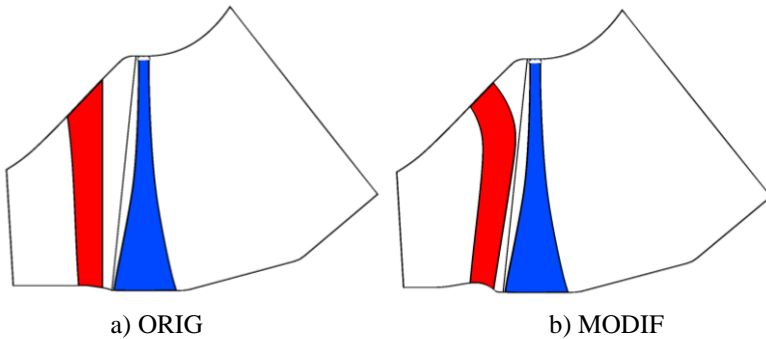
Posledním krokem je analýza výsledků v programu DesignXplorer, kde můžeme vybrat nejlepší variantu a zhodnotit celou DOE analýzu. V této práci je vybrána modifikovaná varianta rozváděcí lopatky s nejvyšší účinností a je označena jako „MODIF“.



Obr. 7: Tvarové modifikace RL

4.3 Výsledky tvarové modifikace

Tato kapitola popisuje výsledky z tvarové modifikace, kde jsou porovnány dva tvary rozváděcí lopatky. Prvním je úvodní tvar RL bez modifikací „ORIG“ a druhým je nejlepší dosažený výsledek z DOE analýzy „MODIF“. Porovnání geometrií ukazuje obrázek 8 a integrální hodnoty posledního stupně jsou v tabulce 1. Z výsledků vidíme, že varianta MODIF má větší hmotnostní průtok stupněm asi o 2 %. Tento nárůst hmotnostního průtoku je specifický pro výpočty jednoho stupně a při výpočtu více stupňů bude minimální. Dalším parametrem ovlivňujícím účinnost stupně je kroutící moment, který je u varianty MODIF vyšší o 4 %. Výsledná účinnost T2S posledního stupně s difuzorem z kroutícího momentu je zvýšena pomocí DOE analýzy o 1,45 %.



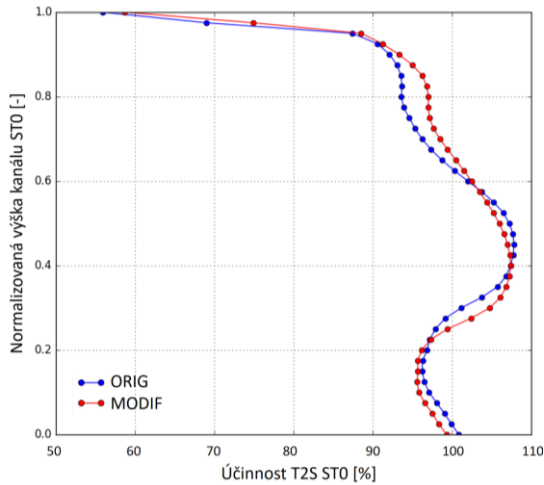
Obr. 8: Porovnání tvaru RL ORIG a MODIF

Varianta	ORIG	MODIF	ROZDÍL [%]
Hmotnostní průtok [kg/s]	169.37	172.88	+ 2.0
Kroutící moment [Nm]	89 120	92 673	+ 4.0
$\eta_{T2S_MK_ST0}$ [%]	96.45	97.90	+ 1.45
Střední reakce [%]	68.25	71.00	+ 2.75

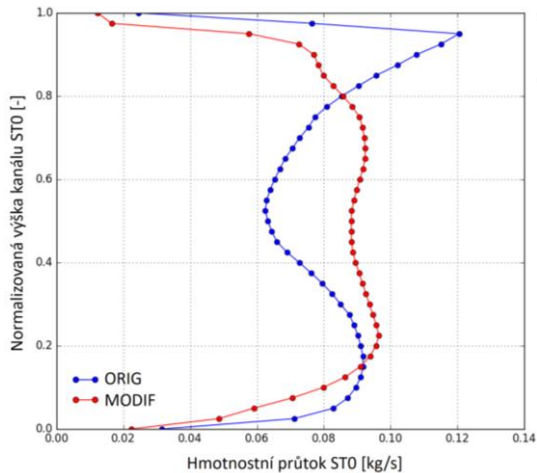
Tab. 1: Porovnání integrálních hodnot varianty ORIG a MODIF

Na obrázku 9 vidíme z rozložení účinnosti po výšce, že největší účinnost je v oblasti 30 % - 65 % normalizované výšky. Proto je dobré směřovat proud páry směrem od okrajových částí lopatky ke středu lopatek, kde jsou menší ztráty a tím vyšší účinnost. Toto pravidlo ovšem platí pouze v omezeném rozsahu a je třeba se na to dívat komplexněji, tzn. nesmí např. docházet k utržení proudu u paty, nebo nesmíme zatížit pouze jednu část

oběžné lopatky. Obrázek 10 názorně ilustruje přerozdělení průtoku směrem ke středu u varianty MODIF, kde je nárůst směřován z okrajových částí do oblasti mezi 20 % - 80 % výšky.



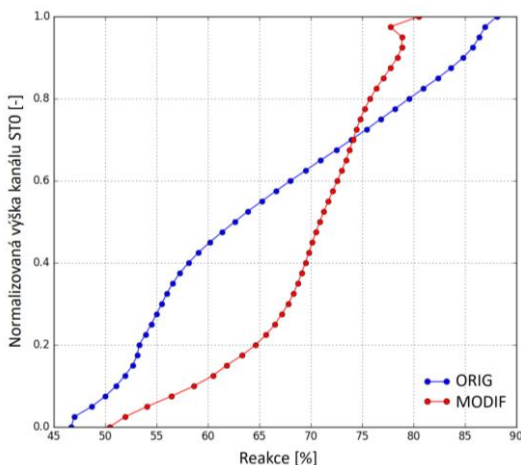
Obr. 9: Porovnání účinnosti T2S u stupně ST0 s difuzorem po výšce



Obr. 10: Porovnání hmotnostního průtoku posledním stupněm ST0 po výšce

Předchozí kapitola popisuje mechanismus zvyšování účinnosti, který je provázen přerozdělením reakce, kdy chceme snižovat reakci na špičce a zvyšovat reakci na patě. Obrázek 11 ukazuje výrazně lepší přerozdělení

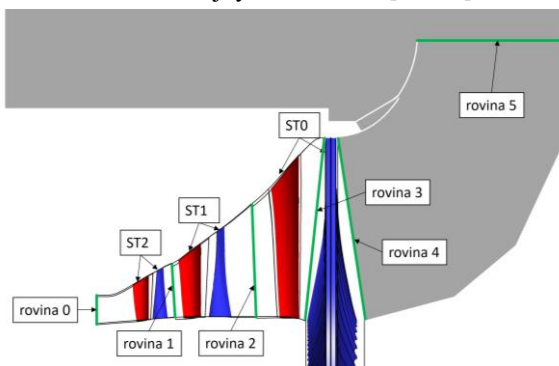
reakce posledního stupně modifikované varianty. Na špičce je reakce u varianty MODIF snížena o 8 %, u paty je reakce zvýšena o 4 %, což má pozitivní efekt na proudění posledním stupněm. Celkový nárůst reakce u varianty MODIF je 2,75 %.



Obr. 11: Porovnání reakce posledního stupně ST0 po výšce

5 Aerodynamická analýza NT dílu s RL „ORIG“ a „MODIF“

V této kapitole jsou analyzovány výsledky optimalizace na komplexním NT dílu s výstupním tělesem, který je znázorněn na obrázku 12. Porovnány jsou varianta ORIG, která nemá 3D tvarovanou RL posledního stupně a varianta „MODIF“ s nejvyšší účinností [40, 41].



Obr. 12: Komplexní výpočetní doména NT dílu PT

Koncepce výpočetní domény, kvalita výpočetní sítě a nastavení numerického řešiče jsou stejné u varianty ORIG i MODIF, abychom mohli porovnat přínos rozváděcí lopatky MODIF. V tabulce 2 je porovnání integrálních hodnot variant ORIG a MODIF na komplexních úlohách pro 3 operační body B1 (odlehčený), B2 (návrhový) a B3 (přetížený). Všechny účinnosti jsou vztaženy k účinnosti T2S z kroutícího momentu posledního stupně ST0, pro návrhový stav B2, který je pro jednoduchost stanoven na 100 % (viz tabulka 2). Diference mezi variantami ORIG a MODIF uvádí tabulka 3. Z těchto výsledků je vidět, že hmotnostní průtok pro variantu ORIG i MODIF je téměř stejný, liší se v tisícinách procenta. Ovlivnění účinnosti stupňů ST1 a ST2, změnou lopatkou posledního stupně ST0 se ukazuje minimální.

Varianta	B1 odlehčený		B2 návrhový		B4 přetížený	
	ORIG	MODIF	ORIG	MODIF	ORIG	MODIF
Hmot. průtok [kg/s]	104.38	104.37	134.69	134.68	205.13	205.16
$\eta_{T2T_MK_ST2}$ [%]	116.802	116.802	116.935	116.935	117.111	117.111
$\eta_{T2T_MK_ST1}$ [%]	115.393	115.37	115.434	115.409	115.54	115.513
$\eta_{T2S_MK_ST0}$ [%]	96.579	98.854	100	101.996	94.919	96.712
$\eta_{T2S_MK_ST012}$ [%]	108.93	109.882	109.609	110.525	106.481	107.418
c_p [-]	-0.222	-0.116	0.147	0.239	0.050	0.184

Tab. 2: Porovnání integrálních hodnot varianty ORIG a MODIF

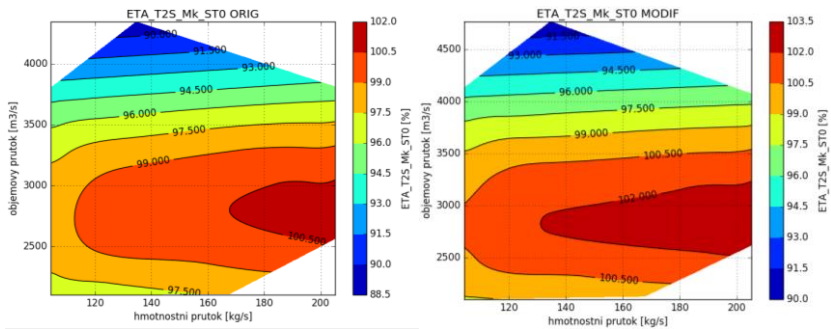
Δ (MODIF – ORIG)	B1 odlehčený	B2 návrhový	B4 přetížený
Δ Hmot. průtok [%]	0.009	0.007	0.014
$\Delta\eta_{T2T_MK_ST2}$ [%]	0.000	0.000	0.000
$\Delta\eta_{T2T_MK_ST1}$ [%]	-0.023	-0.025	-0.027
$\Delta\eta_{T2S_MK_ST0}$ [%]	2.275	1.996	1.793
$\Delta\eta_{T2S_MK_ST012}$ [%]	0.952	0.916	0.937
Δc_p [-]	0.106	0.092	0.134

Tab. 3: Porovnání rozdílů hodnot varianty ORIG a MODIF

Z detailní analýzy NT dílu s výstupním tělesem, kde jsme porovnali varianty ORIG a MODIF plyne, že účinnost ve všech počítaných provezech je vyšší u varianty MODIF.

U návrhového režimu B2 je zvýšena účinnost posledního stupně téměř o 2 procentní body a účinnost T2S celého NT dílu s difuzorem je vyšší o 0,92 procentního bodu.

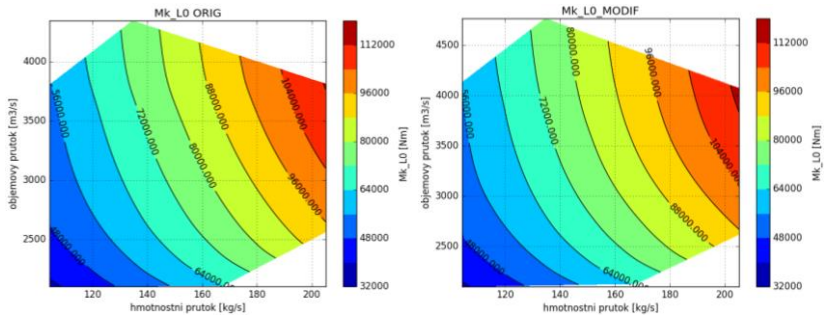
Na pracovních diagramech (obrázek 13) je vidět stejný trend v konturách účinnosti posledního stupně, kde nejvyšší hodnoty účinnosti odpovídají objemovému průtoku přibližně 2800 m³/s, což je blízko právě návrhovému bodu B2. Účinnost dále narůstá se zvyšujícím se hmotnostním průtokem, což je provázáno i zvyšujícím se kroutícím momentem (obrázek 14).



a) ORIG

b) MODIF

Obr. 13: Pracovní diagram účinnosti T2S stupně ST0 $\eta_{T2S_Mk_ST0}$



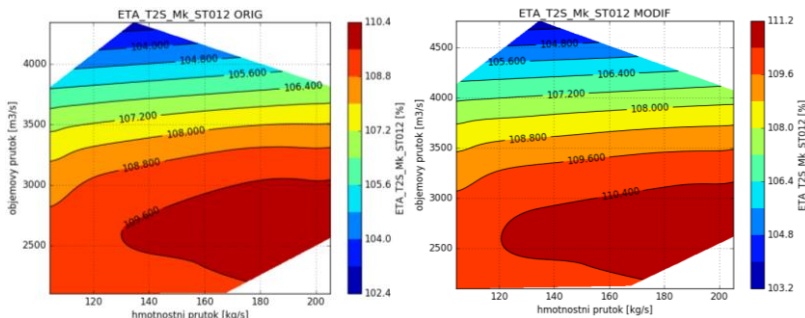
a) ORIG

b) MODIF

Obr. 14: Pracovní diagram kroutícího momentu u OL0 (všechny lopatky)

Trend v rozložení účinnosti v pracovním diagramu celého NT dílu (obrázek 15) je velice podobný jako u posledního NT stupně, pouze nejvyšší hodnoty účinnosti odpovídají mírně nižším hodnotám objemového průtoku,

cca 2600 m³/s. To je pravděpodobně způsobeno zahrnutím dvou předchozích NT stupňů ST1 a ST2.

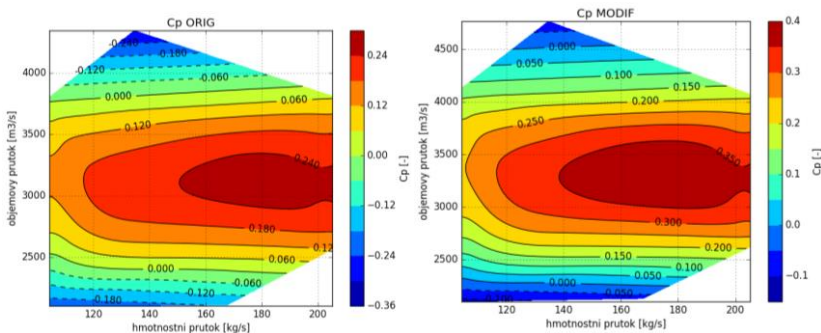


a) ORIG

b) MODIF

Obr. 15: Pracovní diagram účinnosti T2S NT dílu $\eta_{T2S_Mk_ST012}$

Z pracovního diagramu c_p (obrázek 16) je vidět, že optimální objemový průtok se nalézá kolem hodnoty 3200 m³/s. Pro tento objemový průtok je patrný trend ve zvyšování hodnot c_p s rostoucím hmotnostním průtokem až do hodnoty přibližně 200 kg/s, potom se c_p začne snižovat. Toto snížení je pravděpodobně dáno rázovou vlnou u deflektoru, která vzniká při přetížených stavech a způsobuje vyšší ztráty v difuzoru. Jelikož je tlak v kondenzátoru konstantní a u přetížených stavů jsou navýšeny ztráty v difuzoru, projevuje se tato změna i na výstupu z oběžného kola vyšším tlakem. To znamená menší spád na stupně NT dílu a zejména na poslední stupeň. Tato změna by byla ještě výraznější pro větší zatížení, která by byla mimo definovanou pracovní oblast parní turbíny.

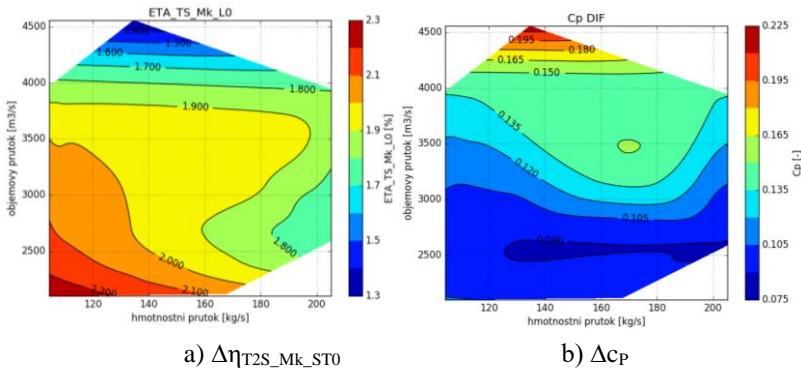


a) ORIG

b) MODIF

Obr. 16: Pracovní diagram c_p

Pracovní diagramy s rozdíly integrálních hodnot variant MODIF a ORIG ukazují, že nejvyšších příspěvků na účinnosti (obrázek 17a) je dosaženo u odlehčených stavů, ale nejvyšší nárůst součinitele zvýšení tlaku c_p (obrázek 17b) naopak roste u stavů s velkým objemovým průtokem. Z toho je patrné, že všechny modifikace a optimalizace posledních NT stupňů je nutné podrobně analyzovat a kontrolovat, jelikož je zde velká provázanost mezi jednotlivými částmi nízkotlakého dílu parní turbíny s difuzorem a výstupním tělesem.



Obr. 17: Pracovní diagram s rozdílem Δ (MODIF – ORIG)

6 Závěr

Předkládaná teze disertační práce se snaží poskytnout komplexní pohled na problematiku NT dílů parních turbín z hlediska možnosti zvyšování účinnosti 3D tvarováním rozváděcích lopatek a to včetně nenávrhových režimů. Jako validace numerického řešení je použito srovnání s experimentem patní mříže oběžné lopatky. Pro toto srovnání jsou použity výsledky pneumatických i optických měření. Na základě provedených analýz dosažených výsledků byly vyvozeny následující závěry:

- Modifikací rozváděcí lopatky posledního NT stupně pomocí axiálního + tangenciálního náklonu a tvarováním paty jsme dosáhli v porovnání s výchozím stavem zvýšení účinnosti T2S na NT díle o 0,92 procentního bodu a u posledního stupně téměř o 2 procentní body. Zvýšení účinnosti je dosaženo pro celý operační diagram parní turbíny.
- Tato práce poukazuje na problematiku nenávrhových režimů, které lze pomocí výše popsaného komplexního numerického modelu počítat a analyzovat s využitím operačních diagramů pro jednotlivé stupně a části libovolných turbín. Ukazuje se, že u nenávrhových režimů je nejsilněji

ovlivněn hlavně poslední nízkotlaký stupeň, u kterého může účinnost při velkých objemových průtocích poklesnout i o desítky procent, zatímco účinnosti předchozích dvou stupňů budou ovlivněny pouze v řádu desetin až jednotek procent.

- Navržená metodika, popsána v disertační práci se ukázala jako efektivní. Zároveň byla stanovena důležitá pravidla, které je vhodné při její aplikaci dodržet. Prezentovaná konkrétní tvarová modifikace RL byla realizována na počítači s 20 jádry a 256 GB operační paměti za přibližně 1 měsíc (příprava numerického modelu a výpočetní strojový čas).

- Pozitivní přínos modifikace rozváděcí lopatky posledního NT stupně je potvrzen i nestacionárním výpočtem, který ukazuje zvýšení účinnosti T2S posledního stupně s částečným difuzorem o 1,3 procentního bodu. Nestacionární výpočet ukazuje velké dynamické zatížení patní části oběžné lopatky interakcí s proudem páry vystupující z rozváděcí lopatky. V souvislosti s tím lze uvést další pozitivní efekt u varianty MODIF, u které bylo sníženo Machovo číslo na výstupu z rozváděcí lopatky a tím i kinetická energie vystupující páry. V důsledku toho je u varianty MODIF sníženo dynamické namáhání paty oběžné lopatky od výstupního proudu páry z rozváděcí lopatky přibližně na polovinu oproti variantě ORIG.

- Na 2D numerickém modelu patní mříže byla provedena validace s experimentem na střední výpočetní síti s y^+ do hodnoty 1,6, kde je prokázána dobrá shoda s naměřenými daty. Odchylka ztrátového součinitele kinetické energie ζ od měření byla do 1 procentního bodu a u výstupního úhlu β_2 do $0,5^\circ$. Dobrá shoda byla dosažena i při porovnání optického měření šířovou metodou s gradientem hustoty získaným numerickou simulací.

- Komplexní numerický model zachycuje také obvodovou nesymetrii proudového pole za oběžným kolem. Tato nesymetrie je způsobena polohou kondenzátoru, který je umístěn pod turbínou. Pro správné stanovení nesymetrie za oběžným kolem musíme odstranit vliv lokálních úplavů za oběžnými lopatkami. To je provedeno proložením obvodových průběhů tlaku a Machova čísla polynomem šestého stupně. Na základě porovnání těchto aproximovaných průběhů je největší rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou tlaku a Machova čísla na patě. Tento rozdíl je u statického tlaku 950 Pa, což odpovídá rozdílu u Machova čísla přibližně 0,12. Tyto obvodové nesymetrie mohou být vyšší, pokud bychom modelovali plný počet rozváděcích lopatek posledního stupně.

Tato práce popisuje metodiku zvyšování účinnosti u parních turbín, ale její použití je universální pro široké spektrum technických aplikací.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DENTON, J.: Loss Mechanisms in Turbomachines. ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition: Cincinnati, May 24-27, 1993. p. 1-32. 93-GT-435.
- [2] KACKER, S., OKAPUU, U.: A mean Line Prediction Method for Axial Flow turbine Efficiency. Journal of Engineering for Power, 1982, vol. 104, p. 111–119.
- [3] ANDERSON, J.: Computational Fluid Dynamic: The Basics with Applications. 2nd ed. McGraw-Hil, 1994. p. 37–93.
- [4] GAO, L., ZHENG, Q., CHEN, H.: Comparative Experimental Investigation on Aerodynamic Performance of Steam Turbine Cascades, Part I - Rotor Blades. ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition: San Antonio, June 3-7, 2013. p. 2. GT2013-94814.
- [5] GAO, L., ZHENG, Q., CHEN, H.: Comparative Experimental Investigation on Aerodynamic Performance of Steam Turbine Cascades, Part II – Stator Vanes. ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition: San Antonio, June 3-7, 2013. p. 2. GT2013-94815.
- [6] ANSYS CFX: Solver Theory Guide. 21th ed. Canonsburg: ANSYS Inc., 2017. p. 1–150.
- [7] GUILLOT, S., WING, F., HAMM, H., LOWE, K.: The Experimental Studies of Improving the Aerodynamic Performance of a Turbine Exhaust System. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Dusseldorf, June 16-20, 2014. p. 13. GT2014-25481.
- [8] ZHOU, D., LIU, B., ZHU, X., DU, Z.: Aerodynamics Prediction and Design of a Steam Turbine Exhaust Hood. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Dusseldorf, June 16-20, 2014. p. 4. GT2014-26114.
- [9] ŽIVNÝ, A., MACÁLKA, A., HOZNEDL, M., SEDLÁK, K., HAJŠMAN, M.: Simulace proudění v NT tělese parní turbíny 1 090 MW. Turbostroje 2016: Plzeň, 21-22. 9.
- [10] GRUBEL, M., STARZMANN, J., SCHATZ, M., EBERLE, T., VOGT, D., SIEVERDING, F.: Two-Phase Flow Modeling and Measurements in Low-Pressure Turbines – Part 1: Numerical Validation of Wet Steam Models and Turbine Modeling. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Dusseldorf, June 16-20, 2014. p. 1-12. GT2014-25244.

- [11] SCHATZ, M., EBERLE, T., GRUBEL, M., STARZMANN, J., VOGT, D., SURKEN, N.: Two-Phase Flow Modeling and Measurements in Low-Pressure Turbines – Part 2: Turbine Wetness Measurement and Comparison to CFD-Predictions. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Dusseldorf, June 16-20, 2014. p. 1-10. GT2014-25245.
- [12] STEIN, P., PFOSTER, CH., SELL, M., GALPIN, P., HANSEN, T.: CFD Modeling of Low Pressure Steam Turbine Radial Diffuser Flow by Using a Novel Multiple Mixing Plane Based Coupling – Simulation and Validation. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition: Montreal, June 15-19, 2015. p. 4-10. GT2015-42632.
- [13] MENG, L., YANG, CH., ZHUHAI, Z., XIAODAN, Z., GUOLIANG, D., YIN, M., LI, J., SUN, Q.: Numerical Tests on the Effect Factors of the Last Stage Blade For Low Pressure Exhaust Hood Simulation. ASME Turbo Expo 2017: Turbine Technical Conference and Exposition: Charlotte, June 26-30, 2017. p. 10-12. GT2017-63964.
- [14] LI, J., LI, Z., FENG, Z.: Effects of the Last Stage Rotor Tip Leakage Flow on the Aerodynamic Performance of the Exhaust Hood for Steam Turbines. ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition: San Antonio, June 3-7, 2013. p. 1-11. GT2013-94377.
- [15] BURTON, Z., INGRAM, G., HOGG, S.: A Novel Method of Coupling the Steam Turbine Exhaust Hood and The Last Stage Blades Using the Non-Linear Harmonic Method. ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition: San Antonio, June 3-7, 2013. p. 2. GT2013-94184.
- [16] VERSTRAETE, T., PRINSIER, J., DI SANTE, A., DELLA GATTA, S., COSI, L.: Design Optimization of a Low Pressure Steam Turbine Radial Diffuser Using an Evolutionary Algorithm and 3D CFD. ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition: Copenhagen, June 11-15, 2012. p. 3-9. GT2012-69515.
- [17] YANG, J., CHEN, T., LI, J., FENG, Z.: Aerodynamic Optimization Design of Exhaust Hood Diffuser for Steam Turbine with Three-Dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes Solutions. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Dusseldorf, June 16-20, 2014. p. 1-10. GT2014-25299.
- [18] VERSTRAETE, T., PRINSIER, J., COSI, L.: Design and Off-Design Optimization of a Low Pressure Steam Turbine Radial Diffuser Using an Evolutionary Algorithm and 3D CFD. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Dusseldorf, June 16-20, 2014. p. 3-9. GT2014-26850.

- [19] MACÁLKA, A., MARTINŮ, P.: CFD Optimization of Stator Blade in the Last Stage of Steam Turbine. *Turbomachines 2012*: Plzeň, 26-27.9. 2012.
- [20] MACÁLKA, A., HOZNEDL, M.: Optimization of IP Diffuser in the Steam Turbine. *Turbomachines 2014*: Plzeň, 24-25.9. 2014.
- [21] MACÁLKA, A., KOSPRDOVÁ, J., KOLÁŘ, P., TUČEK, A., OLDŘICH, J., VLČEK, P.: Optimalizace kompresorového stupně. *ANSYS CFD uživatelské setkání 2008*: Luhačovice, 5-7.11. 2008.
- [22] VLČEK, P., MACÁLKA, A., KOSPRDOVÁ, J., TUČEK, A., KOLÁŘ, P., OLDŘICH, J.: The optimisation of the centrifugal compressor diffuser vanes. *Compressors 2009: 7th International Conference on Compressors and Coolants: Častá Papiernička, 30.9.-2.10. 2009*.
- [23] MACÁLKA, A., KOLÁŘ, P., TUČEK, A., ŠTASTNÝ, M., ŠIMKA, Z.: Tvarová optimalizace průtočných částí turbínového stupně. *Turbostroje 2006*: Plzeň, 21-22.9. 2006.
- [24] ŠIMKA, Z., SYNÁČ, J., TĚTIVA, A., THIEL, P., COX, G., WU, JASON., MACÁLKA, A., TUČEK, A.: Parní turbína s vysokou účinností 3D lopatkování ve Škoda Power. *Turbostroje 2007*: Plzeň, 25-26.9. 2007.
- [25] ŠIMKA, Z., SYNÁČ, J., TĚTIVA, A., RUDAS, B., JŮZA, Z., MACÁLKA, A.: 3D lopatky pro stupně NT dílů. *Turbostroje 2008*: Plzeň, 24-25.9. 2008.
- [26] MACÁLKA, A., ŽIVNÝ, A., HOZNEDL, M., HAJŠMAN, M.: Optimization of IP Diffuser in the Steam Turbine. *Turbomachines 2016*: Plzeň, 21-22.9. 2016.
- [27] DENTON, J., XU, L.: The Exploitation of Three-dimensional Flow in Turbomachinery design, *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 213, 2: pp. 125-137., First Published Feb 1, 1998.
- [28] MEGERLE, B., RICE, T., MCBEAN, I., OTT, P.: Numerical and Experimental Investigation of the Aerodynamic Excitation of a Model Low-Pressure Steam Turbine Stage Operating under Low Volume Flow. *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition: Copenhagen, June 11-15, 2012*. p. 1-11. GT2012-68384.
- [29] SHAO, S., DENG, Q., SHI, H., FENG, Z., CHENG, K., PENG, Z.: Numerical Investigation on Flow Characteristics of Low Pressure Exhaust Hood Under Off-Design Conditions for Steam Turbines. *ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition: San Antonio, June 3-7, 2013*. p. 1-9. GT2013-95257.

- [30] MEGERLE, B., RICE, T., MCBEAN, I., OTT P.: Unsteady Aerodynamics of Low-Pressure Steam Turbines Operating under Low Volume Flow. ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition: San Antonio, June 3-7, 2013. p. 2-9. GT2013-95409.
- [31] WAITE, J., KIELB, R.: Physical Understanding and Sensitivities of LPT Flutter. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Dusseldorf, June 16-20, 2014. p. 1-12. GT2014-25133.
- [32] PETRIE-REPAR, P., MAKHNOV, V., SHABROV, N., SMIRNOV, E., GALAEV, S., ELISEEV K.: Advanced Flutter Analysis of a Long Shrouded Steam Turbine Blade. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Dusseldorf, June 16-20, 2014. p. 1-11. GT2014-26874.
- [33] IRA, J., MACÁLKA, A., SLÁMA, V., ERET, P., TSYMBALYUK, V.: Experimental and CFD Analysis of Steady Subsonic Airfoil in a Stationary Cascade of Turbine Blades. EFM 2017: Experimental fluid mechanics: Mikulov, November 13-16. 2017. p. 1-5.
- [34] SLÁMA, V., RUDAS, B., IRA, J., MACÁLKA, A., ERET, P., TSYMBALYUK, V.: The Validation of Flutter Prediction in a Linear Cascade of Non-Rigid Turbine Blades. ASME Turbo Expo 2018: Turbine Technical Conference and Exposition: Oslo, June 11-15, 2018. p. 1-11. GT2018-75502.
- [35] SLÁMA, V., RUDAS, B., IRA, J., MACÁLKA, A., ERET, P., TSYMBALYUK, V.: Experimental and CFD Investigation of Aerodynamic Forces and Moments in a Linear Turbine Blade Cascade. ASME IMECE 2018: International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Pittsburgh, November 9-15, 2018. p 1-8. IMECE2018-86667.
- [36] SLÁMA, V., RUDAS, B., IRA, J., MACÁLKA, A., ERET, P., TSYMBALYUK, V.: Case Study from CFD Flutter Prediction Validation Using a Linear Cascade Stand. Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín a energetike 2018: Žilina, April 25-27. p. 1-6.
- [37] ŠIMURDA D., LUXA M., ŠAFAŘÍK P., SYNÁČ J., RUDAS B.: Aerodynamic Data for Two Variants of Root Turbine Blade Sections for a 54" Turbine Rotor Blade. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Dusseldorf, June 16-20, 2014. p. 1-13. GT2014-25323.
- [38] ŠIMURDA, D.: Transonické a supersonické proudění v turbínových profilových mřížích: Disertační práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 101 p.

[39] MACÁLKA, A., SYNÁČ, J., VÁCHOVÁ, J., HAJŠMAN, M.: Aerodynamic Optimization of Nozzle for Last Stage of Steam Turbine. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition: Montreal, June 15-19, 2015. p. 5-9. GT2015-42396.

[40] ŽIVNÝ, A., MACÁLKA, A., HOZNEDL, M., SEDLÁK, K., HAJŠMAN, M., KOLOVRATNÍK, M.: Numerical Investigation and Validation of the 1 090 MW Steam Turbine Exhaust Hood Flow Field. ASME Turbo Expo 2017: Turbine Technical Conference and Exposition: Charlotte, June 26-30, 2017. p. 1-9. GT2017-63576.

[41] HOZNEDL, M., ŽIVNÝ, A., MACÁLKA, A., TAJČ, L., SEDLÁK, K., BEDNÁŘ, L., KALISTA, R.: The Pressure Field at the Output from a Low Pressure Exhaust Hood and Condenser Neck of the Steam Turbine 1090 MW – Experimental and Numerical Research. ASME Turbo Expo 2018: Turbine Technical Conference and Exposition: Oslo, June 11-15, 2018. p. 6-8. GT2018-75248.

Publikace autora související s disertační prací

Velká část disertační práce vychází z interních technických zpráv, které nemohou být veřejně publikány. Číslování publikací je pro přehlednost ponecháno stejné jako v kapitole 8 Seznam literatury a informačních zdrojů.

[39] MACÁLKA, A., SYNÁČ, J., VÁCHOVÁ, J., HAJŠMAN, M.: Aerodynamic Optimization of Nozzle for Last Stage of Steam Turbine. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition: Montreal, June 15-19, 2015. p. 5-9. GT2015-42396.

[40] ŽIVNÝ, A., MACÁLKA, A., HOZNEDL, M., SEDLÁK, K., HAJŠMAN, M., KOLOVRATNÍK, M.: Numerical Investigation and Validation of the 1 090 MW Steam Turbine Exhaust Hood Flow Field. ASME Turbo Expo 2017: Turbine Technical Conference and Exposition: Charlotte, June 26-30, 2017. p. 1-9. GT2017-63576.

[41] HOZNEDL, M., ŽIVNÝ, A., MACÁLKA, A., TAJČ, L., SEDLÁK, K., BEDNÁŘ, L., KALISTA, R.: The Pressure Field at the Output from a Low Pressure Exhaust Hood and Condenser Neck of the Steam Turbine 1090 MW – Experimental and Numerical Research. ASME Turbo Expo 2018: Turbine Technical Conference and Exposition: Oslo, June 11-15, 2018. p. 6-8. GT2018-75248.

Vybrané publikace autora přímo nesouvisející s disertační prací

- [19] MACÁLKA, A., MARTINŮ, P.: CFD Optimization of Stator Blade in the Last Stage of Steam Turbine. Turbomachines 2012: Plzeň, 26-27.9. 2012.
- [20] MACÁLKA, A., HOZNEDL, M.: Optimization of IP Diffuser in the Steam Turbine. Turbomachines 2014: Plzeň, 24-25.9. 2014.
- [21] MACÁLKA, A., KOSPRDOVÁ, J., KOLÁŘ, P., TUČEK, A., OLDŘICH, J., VLČEK, P.: Optimalizace kompresorového stupně. ANSYS CFD uživatelské setkání 2008: Luhačovice, 5-7.11. 2008.
- [22] VLČEK, P., MACÁLKA, A., KOSPRDOVÁ, J., TUČEK, A., KOLÁŘ, P., OLDŘICH, J.: The optimisation of the centrifugal compressor diffuser vanes. Compressors 2009: 7th International Conference on Compressors and Coolants: Častá Papiernička, 30.9.-2.10. 2009.
- [23] MACÁLKA, A., KOLÁŘ, P., TUČEK, A., ŠTASTNÝ, M., ŠIMKA, Z.: Tvarová optimalizace průtočných částí turbínového stupně. Turbostroje 2006: Plzeň, 21-22.9. 2006.
- [24] ŠIMKA, Z., SYNÁČ, J., TĚTIVA, A., THIEL, P., COX, G., WU, JASON., MACÁLKA, A., TUČEK, A.: Parní turbína s vysokou účinností 3D lopatkování ve Škoda Power. Turbostroje 2007: Plzeň, 25-26.9. 2007.
- [25] ŠIMKA, Z., SYNÁČ, J., TĚTIVA, A., RUDAS, B., JŮZA, Z., MACÁLKA, A.: 3D lopatky pro stupně NT dílů. Turbostroje 2008: Plzeň, 24-25.9. 2008.
- [26] MACÁLKA, A., ŽIVNÝ, A., HOZNEDL, M., HAJŠMAN, M.: Optimization of IP Diffuser in the Steam Turbine. Turbomachines 2016: Plzeň, 21-22.9. 2016.
- [33] IRA, J., MACÁLKA, A., SLÁMA, V., ERET, P., TSYMBALYUK, V.: Experimental and CFD Analysis of Steady Subsonic Airfoil in a Stationary Cascade of Turbine Blades. EFM 2017: Experimental fluid mechanics: Mikulov, November 13-16. 2017. p. 1-5.
- [34] SLÁMA, V., RUDAS, B., IRA, J., MACÁLKA, A., ERET, P., TSYMBALYUK, V.: The Validation of Flutter Prediction in a Linear Cascade of Non-Rigid Turbine Blades. ASME Turbo Expo 2018: Turbine Technical Conference and Exposition: Oslo, June 11-15, 2018. p. 1-11. GT2018-75502.
- [35] SLÁMA, V., RUDAS, B., IRA, J., MACÁLKA, A., ERET, P., TSYMBALYUK, V.: Experimental and CFD Investigation of Aerodynamic Forces and Moments in a Linear Turbine Blade Cascade. ASME IMECE 2018: International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Pittsburgh, November 9-15, 2018. p 1-8. IMECE2018-86667.

[36] SLÁMA, V., RUDAS, B., IRA, J., MACÁLKA, A., ERET, P., TSYMBALYUK, V.: Case Study from CFD Flutter Prediction Validation Using a Linear Cascade Stand. Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín a energetike 2018: Žilina, April 25-27. p. 1-6.

MACÁLKA, A.: Moderní přístupy optimalizace strojních částí. IT CAD, 04/2011, p. 30-32.

ANTECKÝ, T., MACÁLKA, A.: Flutter Analyse of NASA Rotor 37. Turbomachines 2016: Praha, 24-26.9. 2013.

ŠIMKA, Z., BOBČÍK, M., RUDAS, B., HAJŠMAN, M., ŽIVNÝ, A., MACÁLKA, A., JELÍNEK, T.: Development of Small Turbine Control Stage. Turbomachines 2016: Praha, 24-26.9. 2013.

KROUPA, M., PLAŠIL, V., KOHOUTEK, P., MACÁLKA, A.: The Cold Compressors as a Key Element in The Field of Cryogenic Systems. Conference of Cryogenics and Refrigeration Technologies: Bucharest, May 7-10, 2018.