



EFFECT OF END WALL SHAPING ON STEAM TURBINE STAGE EFFICIENCY

M. Hoznedl*, L. Bednář*, L. Tajč*

Summary: *The paper describes effects of end wall shaping in guide blades on steam turbine stage efficiency. CFD and measurement of straight blade cascades in a wind tunnel were performed. Two stages were investigated in an experimental steam turbine. The effect of partial steam admission was tested.*

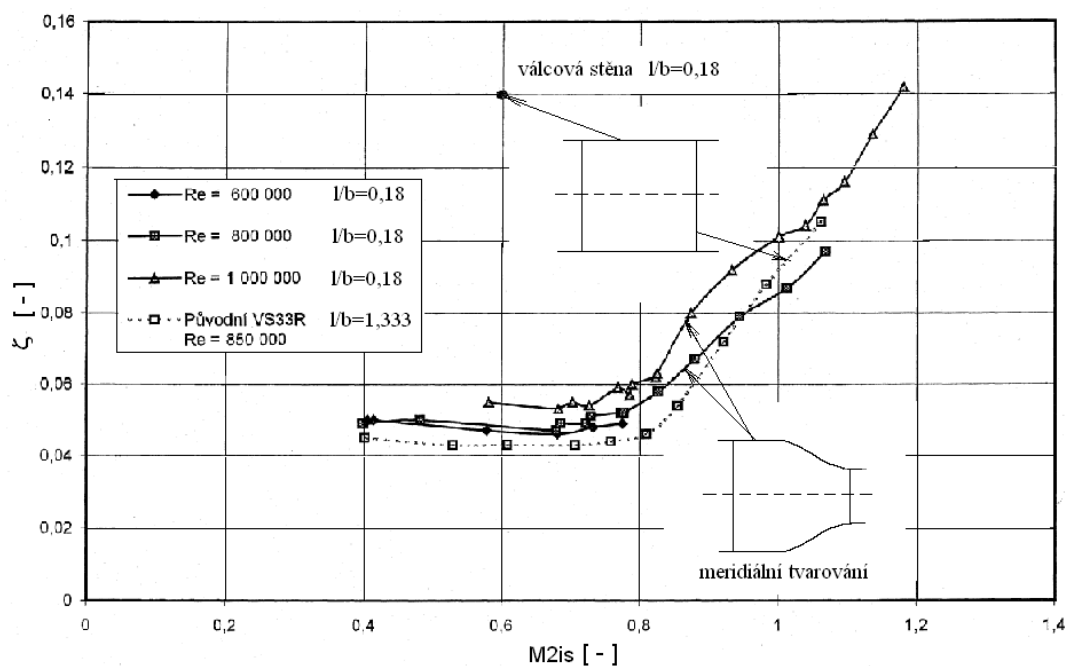
1. Úvod

Existuje řada teorií jak omezit okrajové ztráty v turbínovém stupni a jak optimalizovat proudění v lopatkových mřížích. Mnohé úvahy se týkají i tvarování patní a špičkové omezující stěny. V 60. letech byly publikovány práce, které se týkaly optimalizace tvaru špičkové omezující stěny (Dejč, 1967). Podle těchto studií mohl být očekáván u mříží o štíhlosti $l_1/b_1 < 1$ přínos na účinnosti $\Delta\eta > 1\%$. Z důvodů náročnější technologie výroby se turbínové lopatkové mříže s meridiálním tvarováním mohly dostat do běžné praxe teprve až o desítky let později. Pokroky v optimalizaci návrhu profilu, které již do určité míry reagovaly na 3D proudění a na omezení vlivu okrajových ztrát, vedly k úvahám o nových experimentech s meridiálním tvarováním špičkové omezující stěny stupně a nových výpočtových studiích.

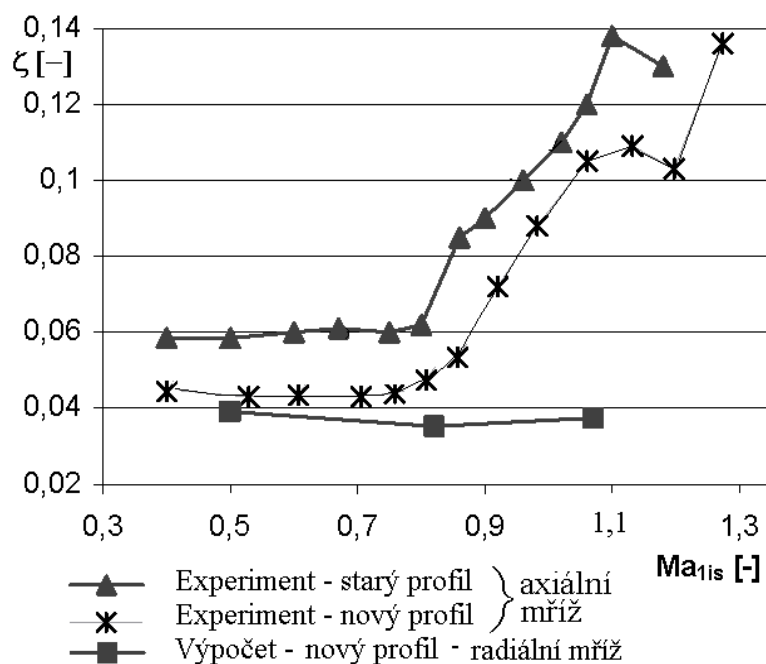
Při vývoji parní turbíny s radiálním regulačním stupněm a plynule měnitelným parciálním ostřikem byla diskutována i možnost snížení okrajových ztrát pomocí symetrického provedení tvarových úprav obou omezujících stěn. Ve VZLU byly měřeny profilové ztráty lopatkové mříže s prizmatickými i tvarovanými lopatkami (Benetka, Valenta, 2003). Po aplikaci tvarových úprav stěn, jak ukazuje Obr. 1, se citelným způsobem snížily profilové ztráty. Pro radiální stupeň byly navrženy nové profily a poté proměřeny v uspořádání axiální lopatkové mříže v aerodynamickém tunelu VZLU.

Pomocí výpočtů byly odhadnuty ztráty pro radiální provedení mříže. Výsledek tohoto postupu je zobrazen na Obr. 2. Optimistické závěry z měření na lopatkových mřížích vedly k návrhu turbínového axiálního stupně s oboustranným meridiálním tvarováním omezujících stěn. Na ZČU v Plzni byla zadána výpočtová studie 3D proudění v turbínovém stupni s různým provedením omezujících stěn (Dvořák, 2006). Cílem výpočtové studie i experimentu bylo objasnit, zda lze poznatky z měření na lopatkové mříži přenést i na axiální turbínový stupeň.

* Ing. Ladislav Tajč, CSc., Ing. Michal Hoznedl, Ph.D., Ing. Lukáš Bednář: ŠKODA POWER a.s., Tylova 1/57, 301 28 Plzeň; tel.: +420.378 185 746, fax: +420.378 185 382; e-mail: michal.hoznedl@doosanskoda.com



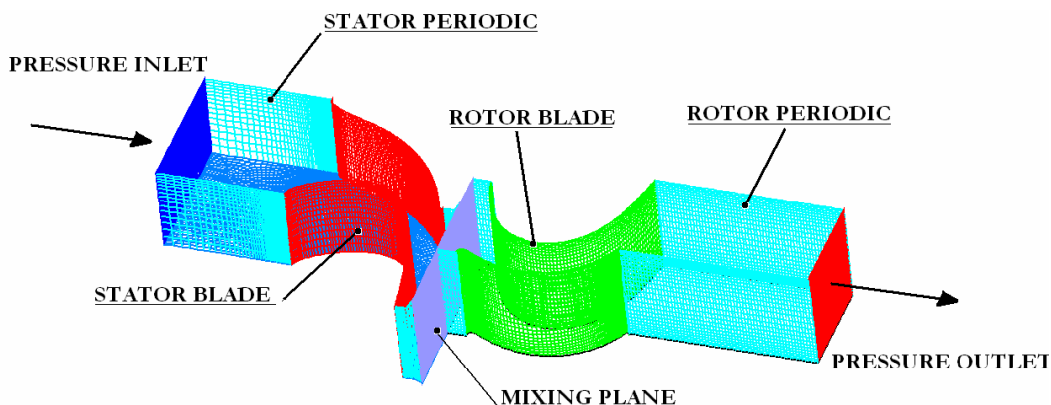
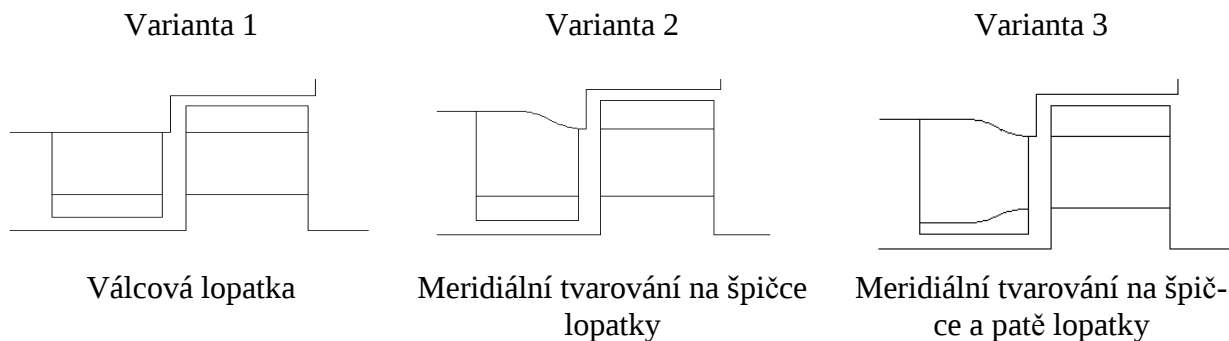
Obr. 1: Vliv tvaru omezujících stěn na profilové ztráty



Obr. 2: Ztráty v původní a nové lopatkové mříži

2. Volba výpočtového modelu

Pro výpočtovou studii byly zvoleny tři varianty mezilopatkového kanálu statorové části turbínového stupně. Jejich charakteristické provedení je znázorněno na Obr. 3. Pro všechny varianty byla nastavena stejná štíhlost a stejné nastavení okrajových podmínek. Vstupní část kanálu je prodloužena o 40 mm a výstupní část o 50 mm. Vliv úniku páry přes ucpávky se zanedbává. Rovněž se neuvažují ventilační ztráty způsobené třením páry o rotující plochy.

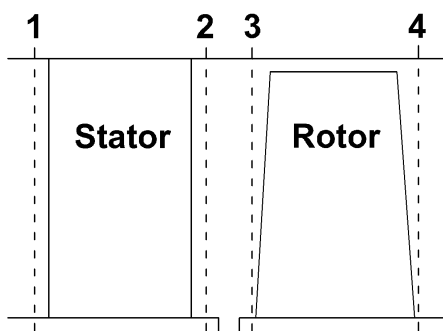


Obr. 3: Řešené varianty a definování okrajových podmínek

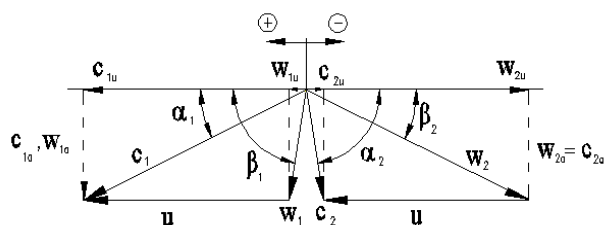
Na Obr. 3 je též znázorněno nastavení okrajových podmínek pro numerickou simulaci. Na vstupu do výpočtového modelu je nastavena tlaková okrajová podmínka „pressure inlet“ a na výstupu z výpočtového modelu pak podmínka „pressure outlet“. Na rozhraní mezi statorovou a rotorovou částí je okrajová podmínka „mixing plane“.

Proudění bylo uvažováno jako stacionární a proudící medium jako stlačitelná newtonovská tekutina. Ve výpočtu byl použit řešič Coupled implicit s nastaveným třetím řádem přesnosti pro proudění a turbulentní viskozitu. Turbulence byla zohledněna modelem Spalart-Allmaras. Výpočet byl prováděn pro poměry na experimentální turbíně.

Výsledky výpočtů se uvažují jako hmotnostní průměrované veličiny ve čtyřech rovinách, které jsou znázorněny na Obr. 4. Rychlostní trojúhelníky turbínového stupně a standardní označení rychlostí a úhlů je uvedeno na Obr. 5.



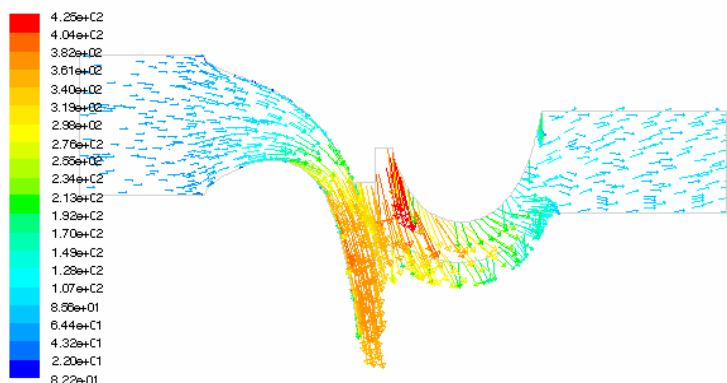
Obr. 4: Roviny pro vyhodnocení



Obr. 5: Rychlostní trojúhelníky stupně

3. Vyhodnocení vypočtených aerodynamických charakteristik

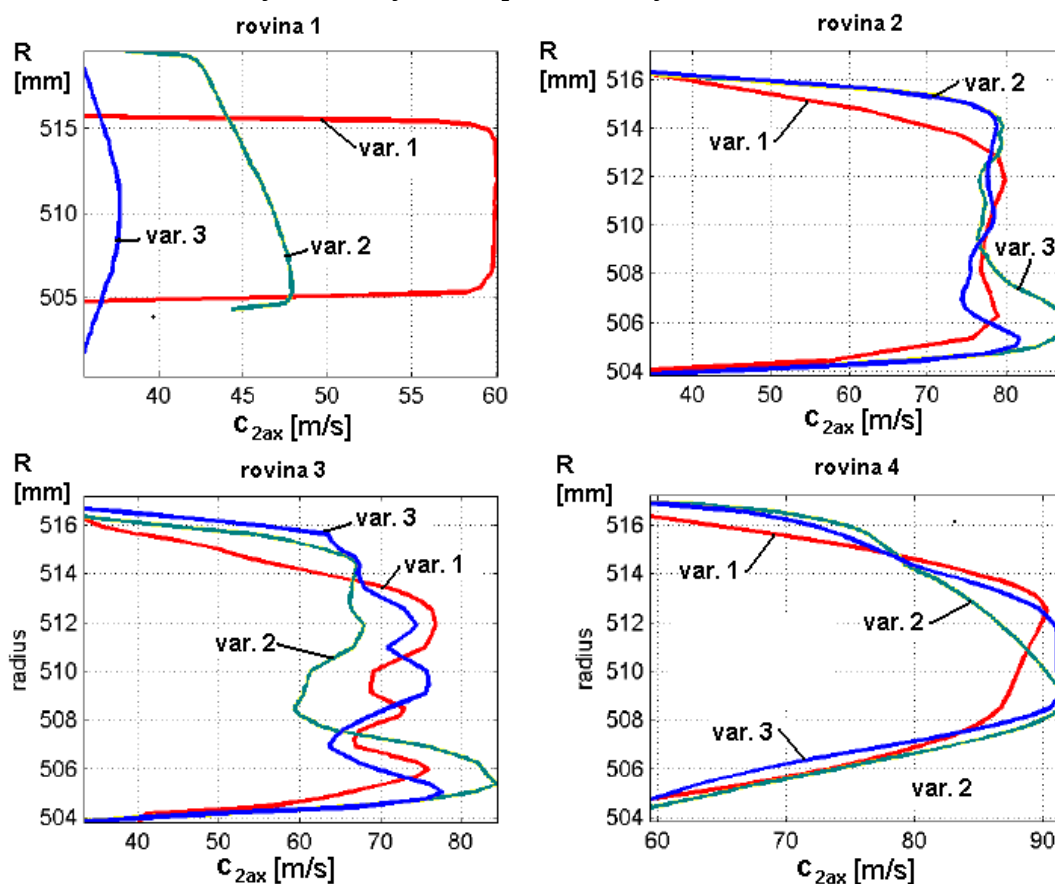
Jednotlivé varianty se liší uspořádáním okrajových partií stupně. Lze tedy předpokládat, že na středním poloměru, kde převládá 2D charakter proudění a účinnost, resp. ztráty odpovídají představě o profilových ztrátách, budou pro všechny varianty proudové parametry přibližně obdobné. Vektory absolutních rychlostí na středním poloměru varianty 1 jsou na Obr. 6.



Obr. 6: Vektory absolutní rychlosti na středním poloměru pro var. 1

Maximální rychlosti se vyskytují za náběžnou hranou oběžné lopatky v okolí jejího hřbetního profilu. Vstupní a výstupní rychlost na stupni je přibližně stejná. Výstupní úhel α_2 je při dané úhlové rychlosti $\omega=377$ rad/s jen nepatrně menší než 90° .

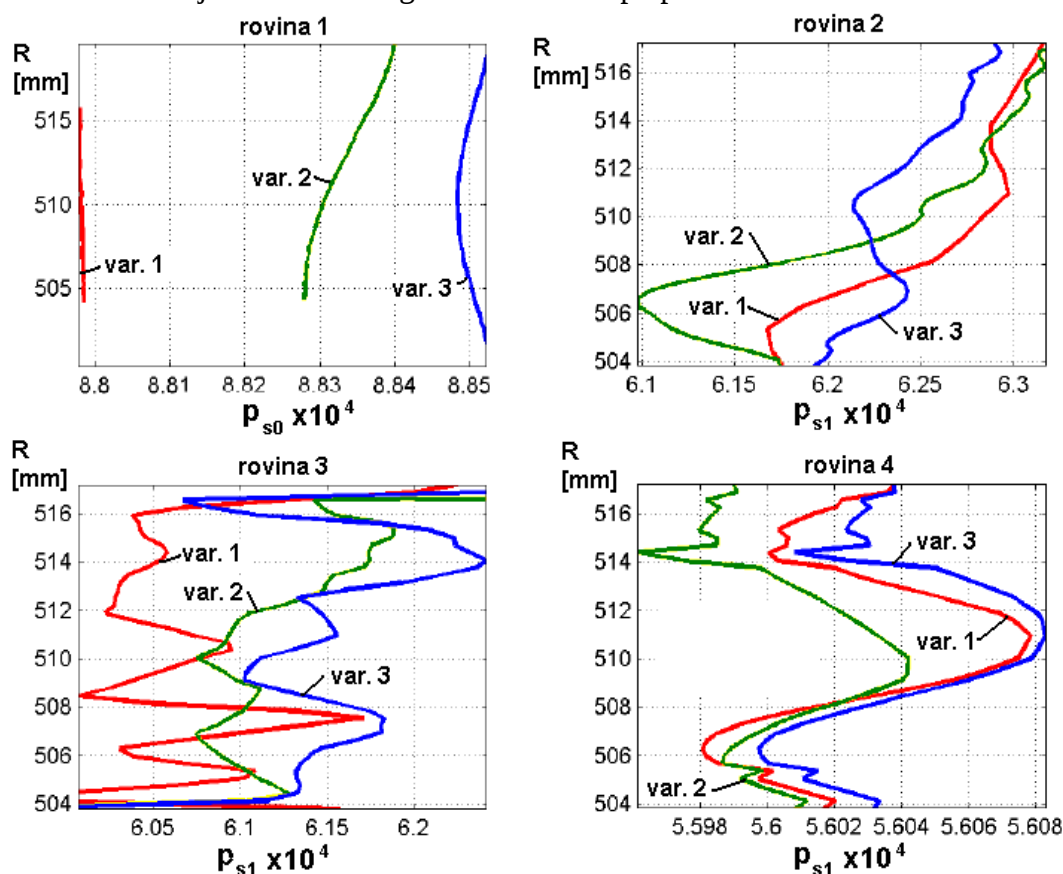
Rozložení střední hodnoty axiální rychlosti podél radiály se nachází na Obr. 7.



Obr. 7: Rozložení axiální složky rychlosti

Rozšíření vstupního úseku vlivem meridiálního tvarování způsobuje zmenšení vstupní rychlosti a nárůst statického tlaku – viz Obr. 8. Tvarové úpravy omezujících stěn způsobují zvětšení rychlosti v okrajových partiích na výstupu ze statorové lopatkové mříže. Rozložení axiální rychlosti na vstupu do oběžné lopatkové mříže má zvlněný, skoro až pilovitý charakter. Čím je to způsobeno, není zřejmé. Vysvětlení bude vyžadovat hlubší rozbor numerické simulace. Střední hodnota axiální rychlosti mírně poklesla a rovněž statický tlak vykazuje pokles. Tomu neodpovídá zachování rovnosti hmotnostních toků.

Na výstupu ze stupně se naplno projevuje pokles rychlosti u stěn. V oběžné mříži se okrajové ztráty projevují v mnohem větší míře než ve statorové části stupně. Ovlivnění ve statoru se týká části $\Delta\ell$, která ve vztahu k těživě b_1 představuje $\Delta\ell/b_1 = 9\%$, zatímco u rotoru to je již $\Delta\ell/b_1 = 30\%$. Vytěsnění proudu páry z okrajových částí stupně znamená, na základě zachování hmotnostního toku, i jisté vylepšení proudových poměrů ve střední části stupně. Lokální zvětšení rychlosti vede k místnímu zlepšení účinnosti. Způsob vyhodnocení ztrát totiž neumožňuje sledovat energetickou bilanci po proudnici.

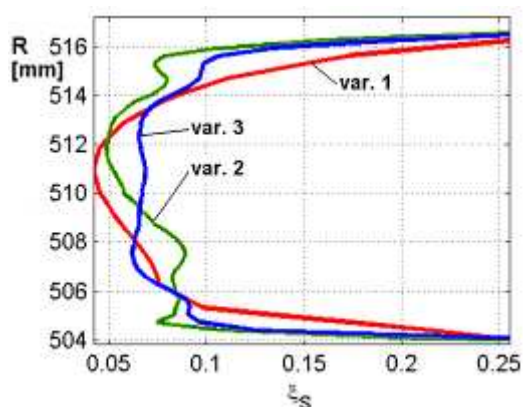


Obr. 8: Statické tlaky

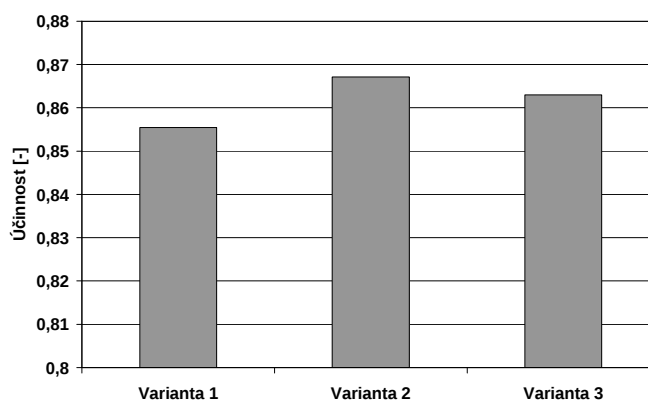
Rozložení statického tlaku v jednotlivých rovinách stupně se nachází na Obr. 8. Vcelku nepochopitelná je změna charakteru rozložení tlaku po přechodu z roviny 2 do roviny 3. V rovině 2 tlak roste od paty ke špičce, což plně odpovídá poznatkům z experimentů. Rozložení tlaků v rovině 3 se nedá použít pro výpočet reakce stupně. Tlakové změny na výstupu ze stupně jsou nepodstatné. Rozložení tlaku u řezu 4 je nepochybně ovlivněno okrajovou podmínkou pro výpočet, kde je zadáván tlak jako konstantní hodnota pro celý průřez. Je třeba podotknout, že tento předpoklad je v souladu s poznatky z experimentů provedených na různých stupních v elektrárnách.

Pro hodnocení kvality mříže, resp. stupně, je důležitý ztrátový součinitel nebo účinnost. Rozložení ztrát ve satorové mříži pro jednotlivé varianty se nachází na Obr. 9. Nejlepší výsledky vykazuje varianta 2, tj. stupeň s úpravou jen špičkové omezující stěny. Úprava patní i špičkové stěny přináší zlepšení v okrajových částech mříže, ale zároveň i zhoršení ve středu kanálu. U všech variant jsou největší ztráty na omezujících stěnách. Je to dáno existencí mezní vrstvy a proudovými jevy v daném místě mříže. Ve středu kanálu pro variantu 2 vychází nulová ztráta. Je to nereálná hodnota. Na všech místech profilu existuje mezní vrstva a úplav. Nulová ztráta může být vysvětlena jen přisunem energie z jiných úseků mříže.

V oběžné mříži jsou největší ztráty opět v blízkosti patní a špičkové omezující stěny. Zabírají však mnohem větší oblast než ve satorové mříži.



Obr. 9: Ztráty ve satoru



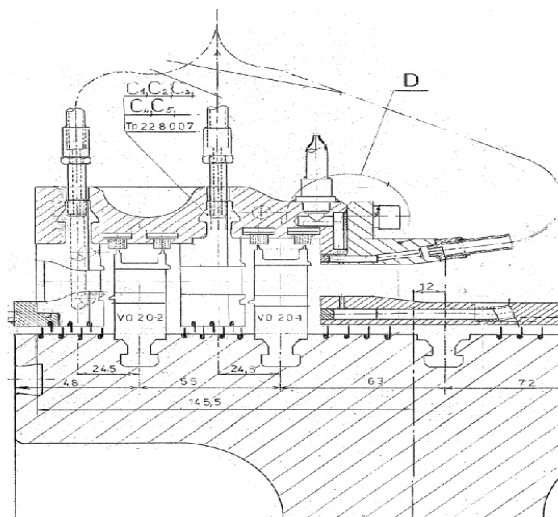
Obr. 10: Účinnost stupně

Účinnost jednotlivých stupňů se nachází na Obr. 10. Při stejné štiřlosti lopatkování se účinnost při použití meridiálního tvarování na špičce a na patě zvýšila oproti prismatickým lopatkám o 0.7% a při úpravě pouze špičky o dalších 0.4%. V daném případě byl uvažován rychlostní poměr $u/c_{is} = 0.52$. S ohledem na malou tětívu je i provozní Reynoldsovo číslo malé ($Re=2 \cdot 10^5$). Stupeň není provozován v automodelové oblasti. Jiný výpočet s $Re=1 \cdot 10^6$ a válcovým zakončením prismatických lopatek vedl k účinnosti $\eta = 90.22 \%$. Experiment se stejným provedením lopatek a provozními parametry vykázal maximální účinnost $\eta = 89.52 \%$ při $u/c = 0.48$. Větší ztráty oproti výpočtu lze připsat na vrub úniku páry přes nadbandážovou ucpávku. Ukazuje se, že meridiální tvarování omezujících stěn v kombinaci s novými profily navrženými podle zásad 3D proudění, nepřináší výraznější nárůst účinnosti. Původní předpoklady se pomocí CFD nepotvrdily.

4. Výsledky z měření na experimentální parní turbíně – bubnový rotor

Pro experimentální účely byla navržena dvoustupňová turbína bubnového typu. Na prvním stupni se použily prvky meridiálního tvarování patní a špičkové omezující stěny. Na Obr. 11 je znázorněn řez bubnovým rotorem se zřetelným meridiálním tvarováním na prvním stupni. Základní charakteristiky lopatkových mříží obou stupňů se nacházejí v Tab. 1.

Jedná se o stupeň rovnotlakého typu pro podzvukové proudění. Místo vyrovnávacích otvorů používaných v discích kol jsou zde uplatněny štěrby pod oběžnými lopatkami. Experimentální turbína je navržena na provoz v podtlaku. Vstupní tlak je tudíž na úrovni $p_0 \approx 0.8$ bar a vstupní teplota $T_0 = 150$ °C. Tlakový poměr na stupních je zpravidla $p_2/p_0 \approx 0.7$. K tomuto provozu se hledá optimální rychlostní poměr u/c , při kterém turbína vykazuje maximální účinnost.



Obr. 11: Dvoustupňová turbína bubnového typu

Tab. 1: Parametry stupňů

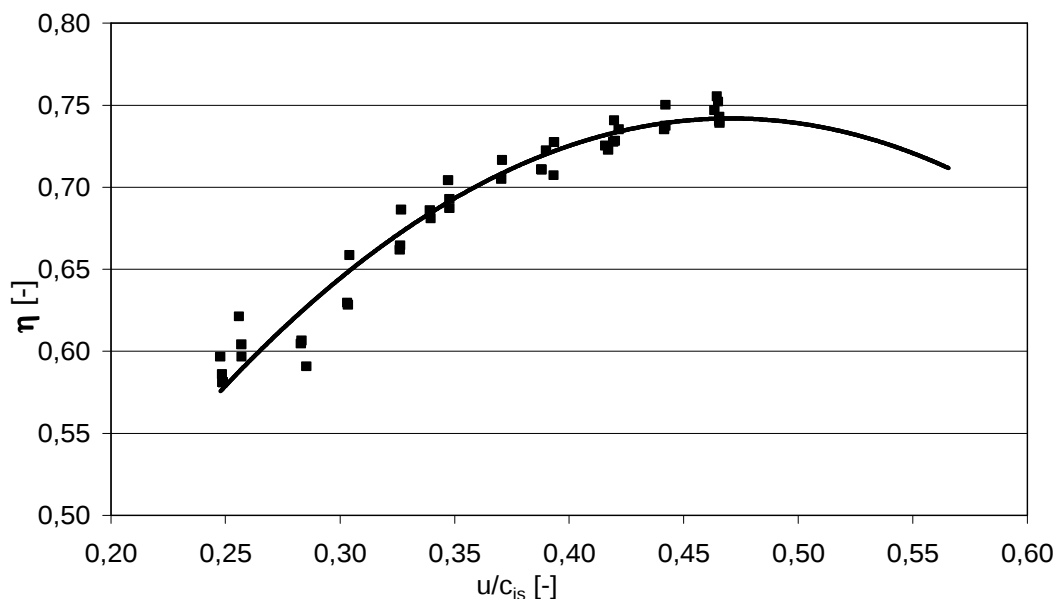
Parametr	1. stupeň		2. stupeň	
	RK	OK	RK	OK
Profil	VS33	VO1001	VS33	VO1001
Tětiva, b [mm]	27	20	27	20
Délka, l [mm]	12	14	15,4	17,4
Štíhlost, l/b	0,44	0,7	0,57	0,87
Počet lopatek, z	170	228	170	258
Poměrná rozteč t/b na střed. průměru	0,698	0,703	0,700	0,623
Patní průměr, Dp [mm]	1008	1007	1008	1007

Měření bylo provedeno na experimentální parní turbíně o výkonu 1MW. Turbína pracuje v podtlaku a energie je mařena vodní brzdou. Právě z důvodu nutnosti měření v podtlaku je vždy Re číslo podstatně nižší, než je ve skutečnosti na díle. Účinnost je při nízkých hodnotách Reynoldsova čísla na stejné geometrii stupně nižší, než na díle.

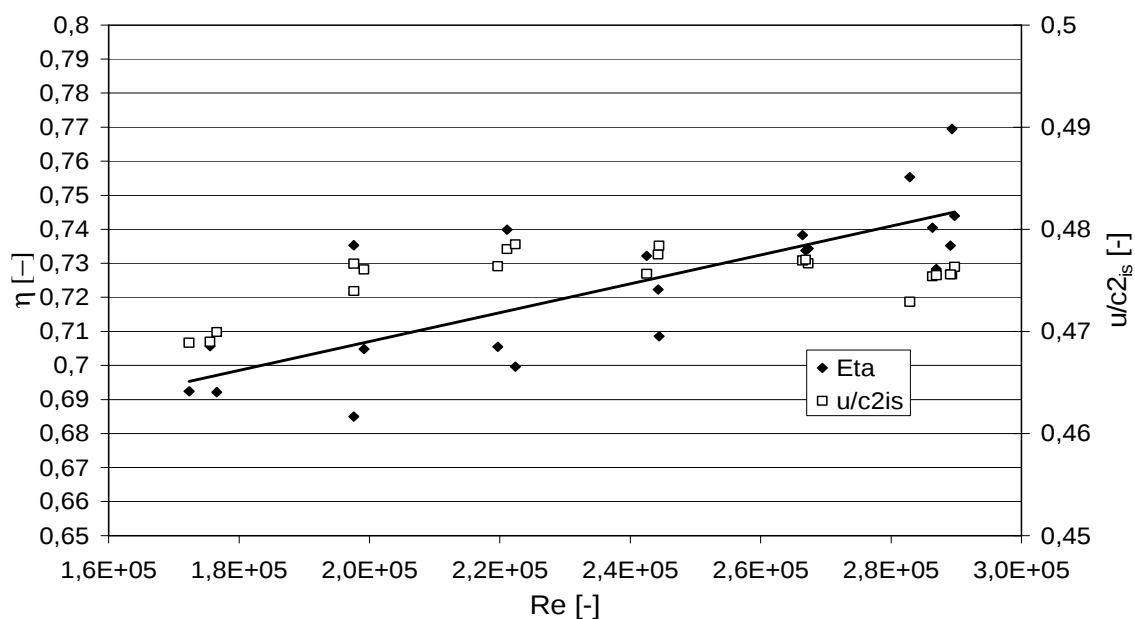
Výsledky se týkají pouze prvního ze dvou stupňů experimentální parní turbíny s meridiálním tvarováním. Byla proměřována závislost účinnosti na velikosti poměru u/c_{is} . Hodnota účinnosti při poměru $u/c_{is} = 0.47$ je rovna 0.746. Průběh závislosti $\eta = f(u/c_{is})$ je na Obr. 12. Reynoldsovo číslo při maximálním poměru u/c_{is} dosahovalo hodnoty $2.9 \cdot 10^5$. Reynoldsovo číslo u numerické simulace v předchozí kapitole dosahovalo hodnot pouze $2 \cdot 10^5$, účinnost by tedy měla být ještě nižší. Rozdíl je však způsobený tím, že ucpávky nebyly v numerických simulacích modelovány. Úniky páry mají zejména u krátkých lopatek stěžejní význam.

Významný vliv Reynoldsova čísla na účinnost ukazuje graf na Obr. 13. Z provozních důvodů nebylo možno měnit Reynoldsovo číslo ve větším rozmezí. I tak je vidět, že na malém rozmezí Reynoldsových čísel došlo k nárůstu účinnosti o více než 5%. Ve stejném grafu je zanesen i průběh u/c_{is} , který byl zachován během celého experimentu konstantní. Není tedy možnost ovlivnění z hlediska nestandardního režimu u/c_{is} . Konstantní během obou měření bylo Machovo číslo. Lze tedy vyloučit i jeho vliv. Problém měření na stupních parní turbíny je nutné vždy posuzovat komplexně.

Vliv Reynoldsova čísla na účinnost je tedy zásadní. Rozlišit v daných podmínkách přínos meridiálního tvarování na účinnost od ostatních vlivů se nepodařilo.



Obr. 12: Závislost účinnosti na poměru u/c_{is}

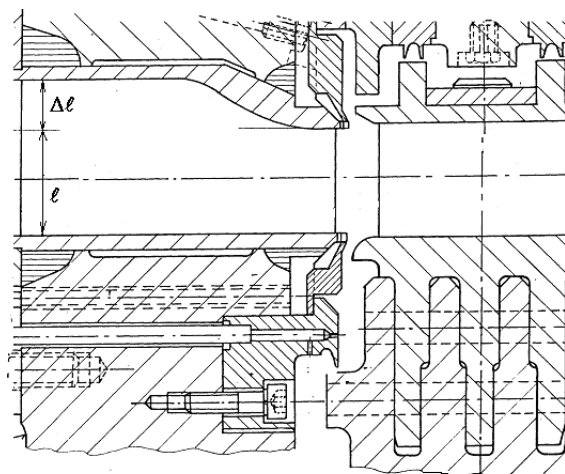


Obr. 13: Závislost účinnosti na Reynoldsově čísle

5. Výsledky z měření na experimentální parní turbíně – diskový rotor

Provedení experimentálního stupně je znázorněno na Obr. 14. Základní informace o lopatkové části se nacházejí v

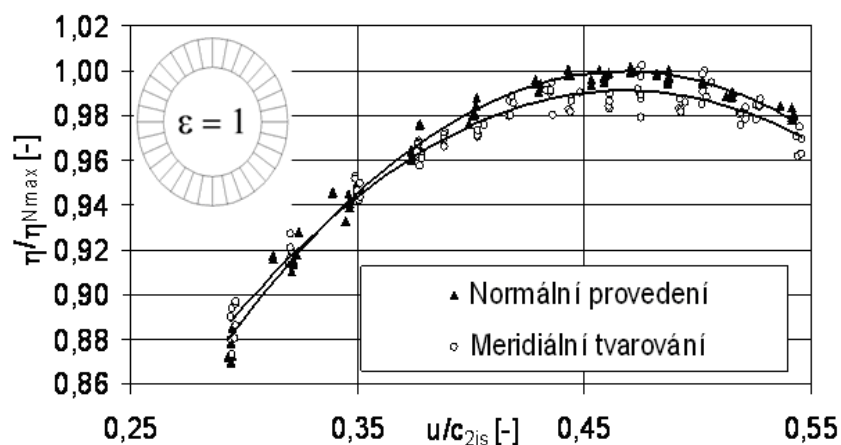
Tab. 2. Je vidět, že se jedná o stupeň s téměř dvojnásobně menší štíhlostí, i když tětíva je mnohonásobně delší, srovnáno se stupněm na bubnovém rotoru. Pro porovnání byl měřen stupeň se stejnými parametry, ale s přímým lopatkováním (Tajč a kol. 2001).



Obr. 14: Geometrie stupně s diskovým rotorem

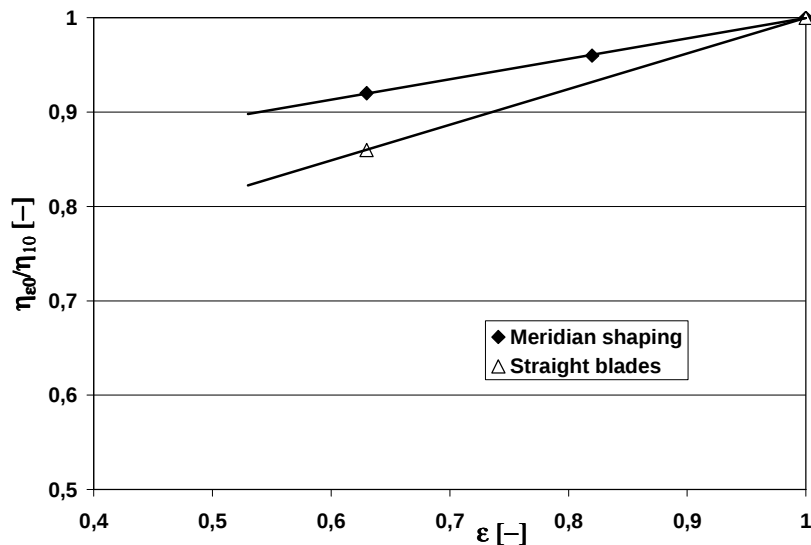
Tab. 2: Geometrie stupně

Kolo	Rozváděcí lopatka	Oběžná lopatka
profil	VS33	VO1001
tětiva s	145	73,21
štíhlost ℓ/b	0,25	0,55
patní průměr	933	930
poměrný přesah $\Delta\ell/\ell$	0,48	0



Obr. 15: Vliv meridiálního tvarování

Oproti stupni s přímými referenčními lopatkami se nepotvrdil u stupně s meridiálním tvarováním další úbytek ztrát. Jak je patrné z Obr. 15, došlo dokonce k mírnému zhoršení. Zde značí hodnota $\varepsilon = 1$ plný ostřík stupně. Úpravy původních profilů se zaměřily na snížení profilových i okrajových ztrát. Meridiální tvarování jedné omezující stěny již nezaručuje u nových profilů navýšení účinnosti stupně. Uplatňuje se však zvětšení stupně reakce a nárůst průtokového součinitele. Zvětšený průtok páry stupněm umožňuje zvětšení přenášeného výkonu. Velmi nadějně je použití meridiální úpravy u stupně s parciálním přívodem páry. Srovnání účinnosti s klasickým provedením stupně se nachází na Obr. 16. Při totálním ostříku se účinnost prakticky nezměnila, ale při parciálním ostříku byl nárůst účinnosti až 10 %.



Obr. 16: Srovnání účinnosti stupňů

Závěr

- Výpočtová studie potvrzuje snížení okrajových ztrát v turbínovém stupni po aplikaci meridiálního tvarování omezujících stěn. Úprava jen špičkové omezující stěny vykazuje lepší výsledky než úprava obou stěn.
- Okrajové ztráty se projevují ve větší míře v rotorové mříži než ve satorové části stupně.
- Při porovnání ztrát v jednotlivých variantách je nutné uvažovat stejnou štíhlost, rychlostní poměr, Machovo a Reynoldsovo číslo, problém posuzovat komplexně.
- Nové profily navržené podle zásad 3D proudění napomáhají ke snížení okrajových ztrát a přínos meridiálního tvarování je nepodstatný.
- Meridiální tvarování má význam při použití parciálního ostříku. Při plném ostříku je jeho použití nevýhodné. Měřením na turbínovém profilu toto prokázáno nebylo.

Poděkování

Autoři příspěvku děkují MPO České republiky za finanční podporu grantu FT-TA2/037.

Literatura

Dejč M. E (1967) *Technická dynamika plynů*. SNTL Praha

Tajč L., Bednář L., Zelený J. (2001) *Vliv meridiálního tvarování rozváděcího kola na účinnost stupně*. Výzkumná zpráva ŠKODA VZTP0899.

Dvořák D. (2006) *Porovnání účinností stupňů o relativně malé štíhlosti s různým provedením omezujících stěn*. Diplomová práce, ZČU Plzeň.

Benetka J., Valenta R. (2003) *Měření mříže VS33Rz s bočně se zužujícím mezilopatkovým kanálem*. Výzkumná zpráva VZLÚ V-1779/03.