



EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BLADE GRIDS AND TURBINE STAGES DESIGNED BY CFD

L. Tajč*, I. Šiková*

***Summary:** Experimental investigation of profile and secondary losses is presented here. The loss coefficients of different types of blade cascades are evaluated, the efficiency of turbine stages is measured. The quality of profiles designed for the subsonic and transonic flow, as well as the tip and hub and walls design of turbine stages were tested on an aerodynamic wind tunnel and on an experimental steam turbine. 3D design of blades is described in the paper.*

1. Úvod

Snaha minimalizovat ztráty v turbínových stupních vede ke tvorbě nových profilů se sníženými profilovými ztrátami, k návrhu profilů se specifickým uplatněním a k hledání způsobů snížení okrajových ztrát. Zkoušejí se i dodatečné úpravy původních profilů použitých v parních turbínách starší výroby. Pokroky v technologii výroby lopatek umožňují zavést do praxe i složitější úpravy tvaru lopatkového kanálu i 3D tvarované lopatky. Typickým příkladem je meridiální tvarování navržené Prof. Dejčem (Dejč & Zarjankin, 1960). Kombinace nových profilů u meridiálního tvarování vedla k potřebě dodatečných experimentů, které upřesňují rozsah použití. V různých teoretických rozborech a výpočtových studiích se uvažují lopatky banánového tvaru.

Měření na experimentální turbíně umožní stanovit skutečný přínos a rozsah použití. Aplikace CFD vede k návrhu profilů s nižšími ztrátami. Kvalita profilů se nechá ověřit na testech v aerodynamickém tunelu a na stupních v experimentální turbíně. Při experimentech se zpravidla volí stejná základní geometrie turbínových stupňů, aby se podchytil jen vliv či přínos sledované úpravy.

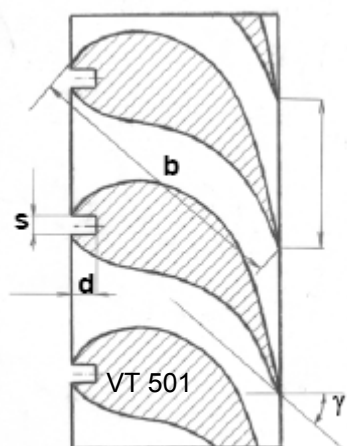
Rovněž provozní parametry na experimentální turbíně jsou zpravidla stejné. Cílem předložené práce je ukázat přínos na účinnosti při použití nových moderních profilů vzniklých pomocí CFD a rozsah jejich aplikací.

* Ing. Ladislav Tajč, CSc., Ing. Irena Šiková: Experimentální podpora výzkumu, ŠKODA POWER a.s.; Tylova 57, 316 00 Plzeň; tel.: +420 37 818 5967, fax: + 420 37 818 5382; e-mail: ladislav.tajc@skoda.cz, irena.sikova@skoda.cz

2. Úpravy původních prizmatických lopatek

Jistý způsob snižování okrajových ztrát předložil Prof. Zarjankin z MEI (Zarjankin & Paramonov, 2000). Spočívá v drážkování náběžných hran rozváděcích lopatek. Pomocí kanálku podél lopatky se může ovlivnit rozložení tlaků ve vstupní části lopatkové mříže. Ve ŠKODA POWER a.s. byl uskutečněn experiment s upravenou náběžnou hranou staršího typu provedení stupně.

Charakteristické údaje úpravy profilu VT501 jsou na obr. 1 a v příslušné tabulce.



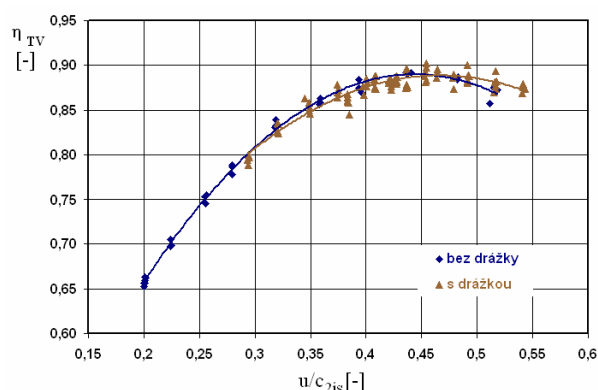
Tabulka 1

Kolo	Rozváděcí lopatky	Oběžné lopatky
Profil	VT 501	VO 70-45/45B1
Tětiva b	145	70
Počet lopatek	40	74
Délka lopatky l	56,5	60
Štíhlost l/b	0,39	0,86
Patní průměr D_p	933	930

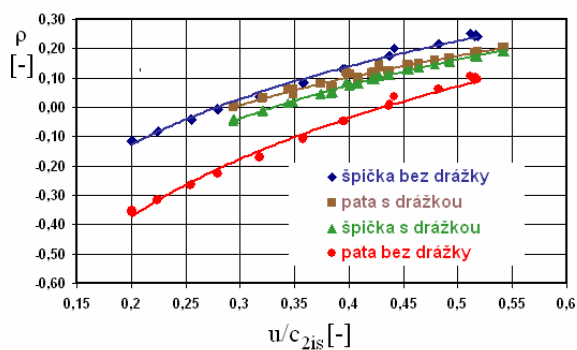
$$s/b = 0,064$$

Obr. 1 Rozváděcí lopatky s drážkami

Provedení drážky odpovídá technologickým a výrobním možnostem. Ukázalo se, že při nulovém úhlu náběhu se účinnost stupně nezměnila. Srovnání účinnosti původního a upraveného stupně se nachází na obr. 2. Výsledek experimentu je v souladu se závěry Prof. Zarjankina, který potvrzuje zisk až od štíhlosti $l_1/b_1 > 1$. V našem případě byla štíhlost $l_1/b_1 = 0,39$. Měření na turbíně však ukázalo na jiný efekt. Došlo ke změnám v rozložení reakce u paty a špičky stupně. Je to zřejmé z obr. 3.



Obr. 2 Vliv žlábků na termodynamickou účinnost stupně



Obr. 3 Vliv žlábků na stupeň reakce

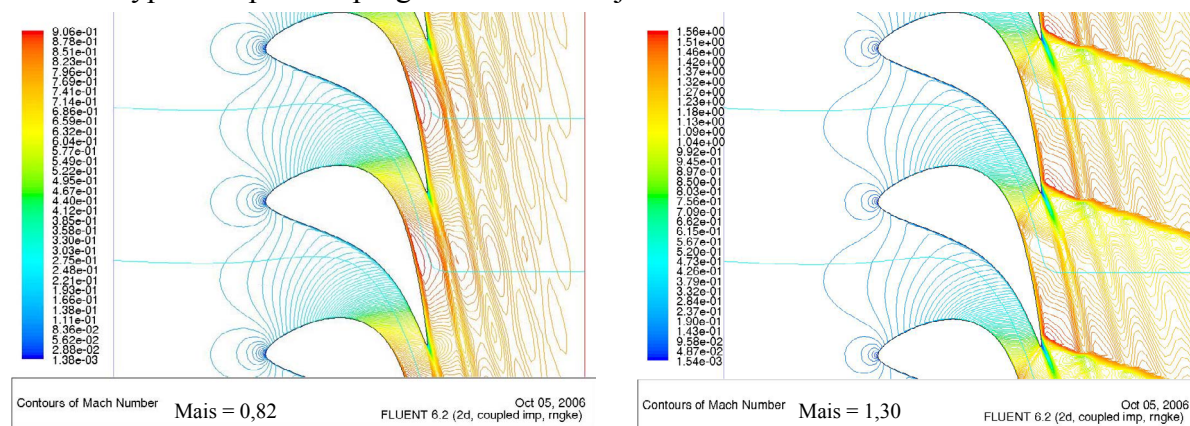
Po provedení žlábků se prakticky vyrovnala reakce mezi patou a špičkou stupně. Zároveň se snížil průtokový součinitel skoro o 15 %. Pro zachování původního výkonu je tedy zapotřebí prodloužit lopatky a tím vlastně snížit podíl okrajových ztrát na celkových ztrátách.

Tato úprava tedy vyžaduje výměnu lopatek. Z praktického hlediska je však vhodnější použít nové profily, které vykazují menší profilové i okrajové ztráty. Nové profily mají menší poloměr náběžné hrany. Na základě výpočtových studií lze konstatovat, že nové profily nejsou vhodné pro aplikaci drážek.

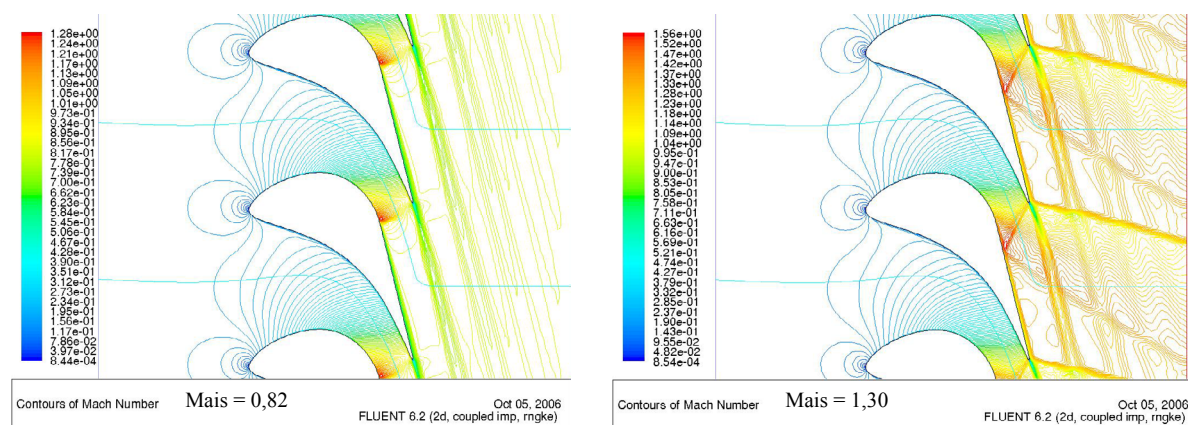
3. Profily pro VT části parních turbín

Pomocí CFD se podařilo navrhnout nové profily pro vysokotlakou část parních turbín. Jsou dostatečně robustní, přičemž, jak ukázaly výpočty i testy v aerodynamickém tunelu, si zachovávají přijatelně nízké profilové ztráty. Pro podzvukové proudění je určen profil označený jako VS 33 a pro stupně s vyššími hodnotami Machova čísla, jako jsou třeba regulační stupně, je navržen profil VS 33U.

Charakteristické rozložení Machových čísel pro podzvukové a transsonické proudění získané výpočtem pomocí programu FLUENT je zobrazeno na obr. 4 a 5.



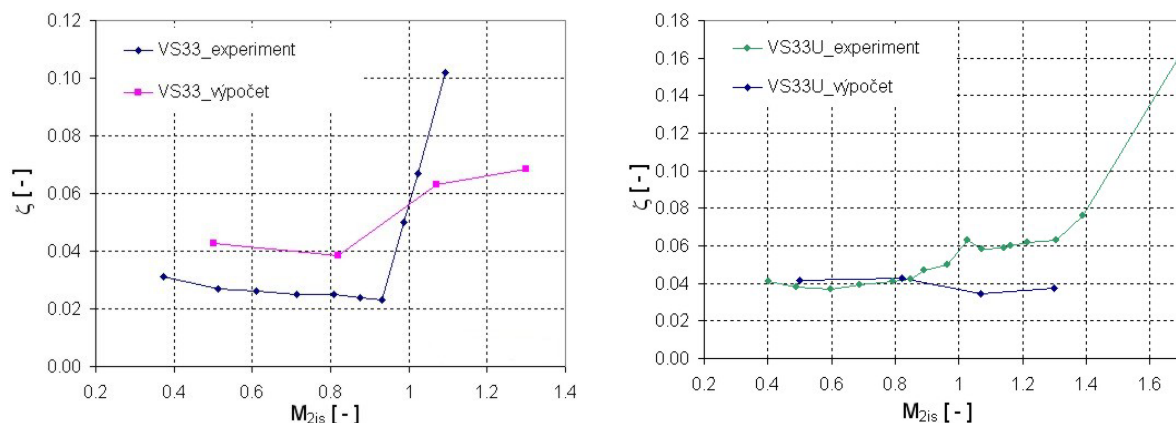
Obr. 4 Rozložení Machových čísel pro profil VS 33



Obr. 5 Rozložení Machových čísel pro profil VS 33U

Ve všech případech se uvažuje poměrná rozteč $t/b = 0,7$. Úpravou podtlakové strany se podařilo u profilu VS 33U zlepšit konfiguraci rázových vln i rozložení tlaku na povrchu profilu při transsonickém proudění. U upravovaného profilu dochází při proudění páry

k supersonické kompresi a k interakci vnitřní větve výstupní rázové vlny s mezní vrstvou na podtlakové straně profilu bez odtržení proudu. Výsledkem je snížení profilových ztrát při transsonickém průtoku páry profilovou mříží. Zvětšení ztrát v podzvukové oblasti proudění není podstatné, jelikož pro tyto aerodynamické poměry není profil určen. Zlepšení proudových poměrů potvrzují vypočtené a změřené hodnoty ztrátových součinitelů, které jsou zobrazeny na obr. 6.



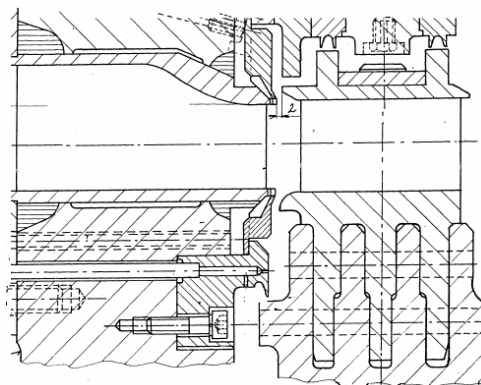
Obr. 6 Srovnání vypočtených a měřených ztrát v lopatkové mříži

Výpočet udává v podzvukové oblasti pro profil VS 33 větší ztrátu než jaká vychází z měření na aerodynamickém tunelu. Zároveň se ukazuje, že pro nadzvukové proudění je tomu naopak. Profil upravený pro vyšší hodnoty Machových čísel má příznivější hodnoty ztrát právě v oblasti vyšších rychlostí.

Jednotlivé profily navržené pro rozváděcí mříž vykazují lepší užitné vlastnosti, ale rozhodující je hodnocení celého turbínového stupně. Pro praxi je důležité zejména stanovení účinnosti pro konkrétní štíhlost při reálných provozních stavech. Experimenty mohou podchytit všechny okrajové vlivy, včetně ventilačních ztrát disku i úniku páry přes nadbandážové ucpávky.

4. Meridiální tvarování turbínového stupně

Byla snaha uplatnit u regulačních stupňů vedle nových profilů i meridiální tvarování vnější omezující stěny. Provedení stupně je znázorněno na obr. 7. Základní informace o lopatkové části se nacházejí v tabulce 2.

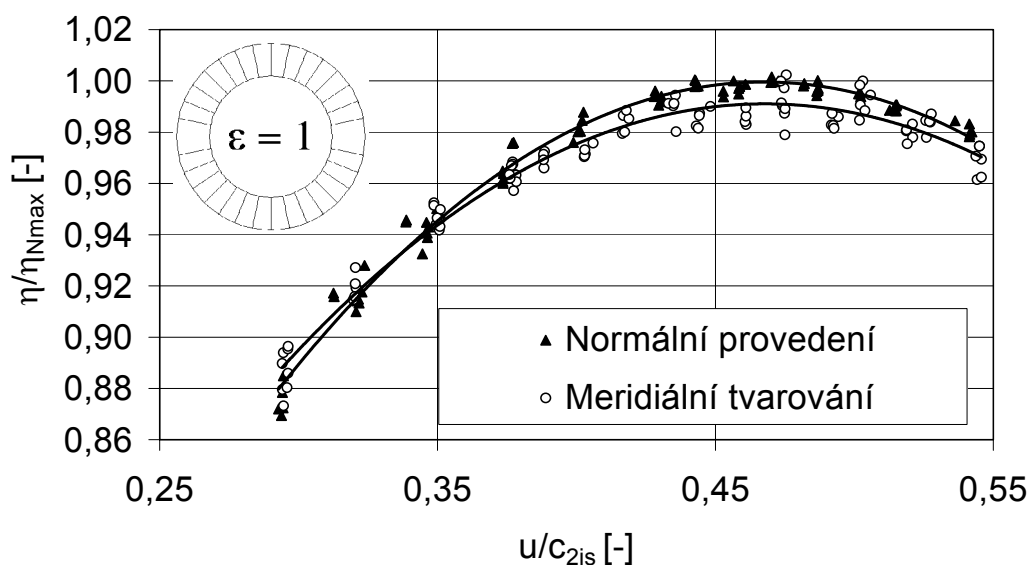


Obr. 7: Stupeň s meridiálním tvarováním

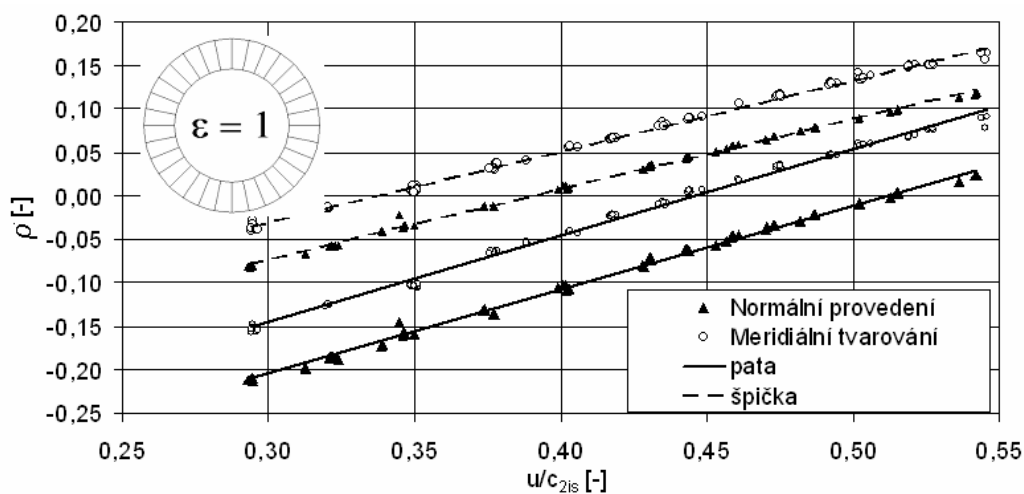
Tabulka 2

Kolo	Rozváděcí lopatky	Oběžné lopatky
Profil	VS33	VO1001
Těživa b	145	73,21
Počet lopatek	32	74
Délka lopatky ℓ	36,5	40
Štíhlost $\frac{\ell}{b}$	0,25	0,55
Patní průměr D_p	933	930
Poměrný přesah $\frac{\Delta\ell}{\ell}$	0,48	0
Úhel nastavení γ'	40	15,48

Výsledky experimentů byly překvapivé. Nepotvrdil se totiž další úbytek ztrát. Jak je patrné z obr. 8, došlo dokonce k mírnému zhoršení. 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 – viz. obr. 9 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. 10. Při totálním ostříku se účinnost prakticky nezměnila, ale při parciálním ostříku byl nárůst účinnosti až 10 %.

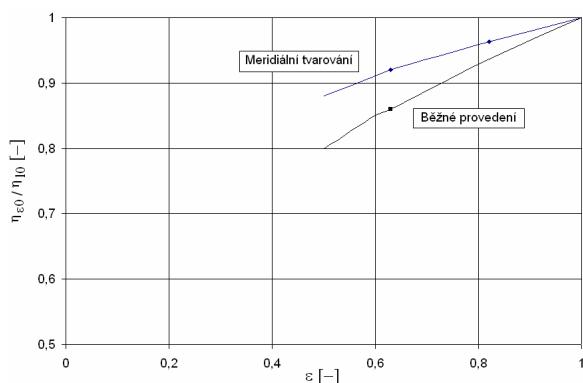


Obr. 8 Srovnání účinnosti stupňů

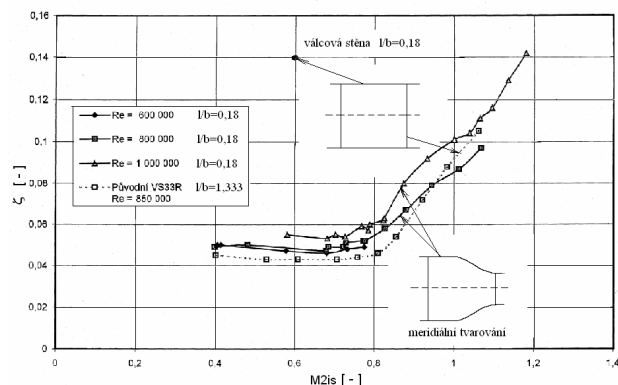


Obr. 9 Srovnání stupně reakce

V aerodynamickém tunelu se otestovala lopatková mříž s meridiálním tvarováním obou omezujících stěn. V tomto případě se jednalo o radiální lopatkovou mříž o štíhlosti $l/b=0,18$. Ztrátový součinitel se stanovil pro střední řez. Výsledky jsou velmi povzbudivé. Porovnání naměřených hodnot se nachází na obr. 11. Pro původní provedení stěn se změřila hodnota $\zeta = 0,14$, kdežto po úpravě byl ztrátový součinitel srovnatelný s původními 2D experimenty ($l/b=1,33$).



Obr. 10 Vliv parciálního ostříku na účinnost



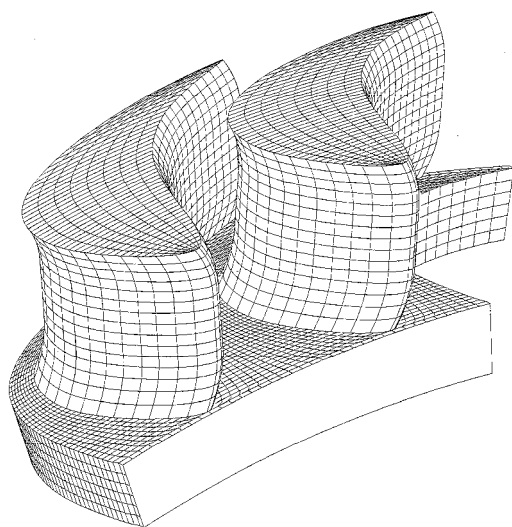
Obr. 11 Vliv symetrického meridiálního tvarování na ztráty v mříži

5. Tvarované lopatky (Compound Lean)

Další rezervy ve snižování ztrát spočívají pouze v optimalizaci tvaru lopatky i celého stupně. Na základě řady teoretických prací a výpočtových studií se ve ŠKODA POWER přistoupilo k zavedení 3D tvarovaných lopatek do běžné praxe. Zvolila se metoda sdruženého náklonu (Compound Lean) u rozváděcích lopatek. Použily se modernizované profily VS33 a VO1001 pro sestavení stupně. Celá optimalizační úloha se řešila ve spolupráci s Institute of Engineering Thermophysics Chinese Academy of Sciences v Číně (Chen & Xu, 1997).

Porovnávalo se 5 tvarových úprav rozváděcí lopatky pro dvě štíhlosti. Nejlepší uspořádání lopatek se experimentálně ověřilo na modelové turbíně.

Uspořádání mříže s lopatkami banánového tvaru je znázorněno na obr. 12. Uplatňuje se zde jisté posouvání profilů v obvodovém směru. Původní průtočná plocha se nemění. Aby se mohl posoudit vliv konkrétní úpravy axiálního turbínového stupně, jsou při experimentech používány standardní charakteristické rozměry, které odpovídají 2. stupni turbíny o výkonu 500 MW. Platí pro něj údaje v tabulce 3.

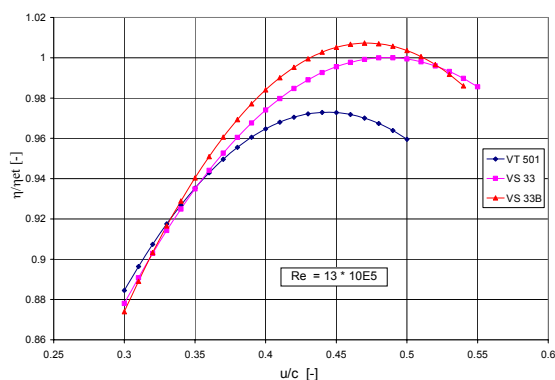


Tabulka 3

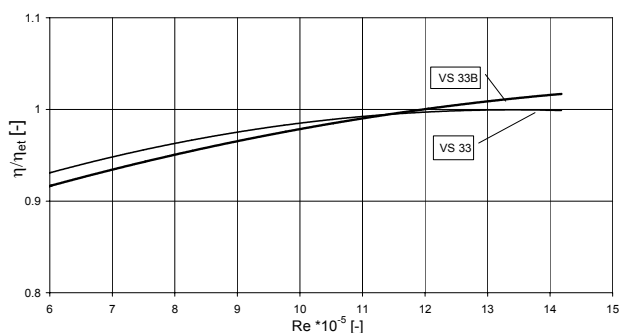
		VS33B	VO1001
Tětiva	b	145	70
Počet lopatek	z	40	74
Délka lopatky	l	56,5	60
Štíhlost	l/b	0,39	0,86
Patní průměr	Dp	933	930

Obr. 12 Lopatky banánového tvaru

Pro stejné rozměry a počty lopatek ale s původními profily VT 501 a pro nové prizmatické lopatky s profily VS33 se uskutečnilo obdobné měření na experimentální turbíně. Srovnání termodynamických účinností tří stupňů se nachází na obr. 13. Jako základ se uvažuje účinnost pro stupeň s novými profily (VS33 a VO1001) s prizmatickým uspořádáním lopatek. Ze srovnání je vidět zlepšení účinnosti po přechodu z původních profilů na nové. Použitím banánových lopatek se dosáhlo dalšího vylepšení účinnosti. Ve všech případech se v rychlostním poměru u/c uvažuje obvodová rychlost na patním průměru u_{1p} . S přechodem na nové profily se nepatrně zvedá optimální hodnota u/c . Stupeň s prizmatickými i banánovými lopatkami zůstává v kategorii rovnotlakových stupňů.



Obr. 13 Srovnání účinnosti 3 stupňů



Obr. 14 Vliv Reynoldsova čísla na účinnost

Účinnost stupně závisí na Reynoldsově číslu. U stupňů VT dílů, kde se uplatňují krátké lopatky, se při dané drsnosti povrchu vliv Reynoldsova čísla neprojevuje. Jinak je tomu při experimentech na modelové turbíně, kde se používá přehřátá pára o nižší teplotě než na díle nebo při měřeních na vzduchové turbíně. Jak souvisí měřená účinnost stupňů s prizmatickými a banánovými lopatkami s Reynoldsovým číslem ukazuje obr. 14. U banánových lopatek se přechod do autodelové oblasti posouvá k vyšším hodnotám Reynoldsových čísel. Uplatňuje se zde pravděpodobně rozdílné působení třecích sil na okrajové partie stupně. Při našich experimentech jsme u banánových lopatek ještě nedosáhli maximální hodnoty. Při nižších hodnotách čísla Re se potlačují přednosti banánových lopatek. Experimenty na vzduchové turbíně na Univerzitě v Plzni při $Re = 3 \cdot 10^5$ rovněž neprokázaly přínos u této úpravy rozváděcích lopatek (Vomela & Milčák, 2005).

6. Závěry

- Drážka v náběžné hraně v rozváděcí lopatce způsobuje srovnání reakce na patě a špičce stupně, ale nemá vliv na růst účinnosti stupňů u relativně krátkých lopatek.
- Pomocí CFD lze navrhnout profily, které mají minimální profilové ztráty pro zadané proudové parametry. Neznamená to však záruku minimálních ztrát v turbínovém stupni.
- Nové profily umožňují i u prizmatických lopatek citelně snížit ztráty u turbínových stupňů. Meridiální tvarování špičkové omezující stěny v kombinaci s novými profily nezaručují snížení ztrát ve stupni. Meridiální tvarování je vhodné pro parciální ostřík.
- Aplikace „Compound Lean“ u rozváděcích lopatek je přínosná u stupňů s malou štíhlostí a Reynoldsových číslech typických pro VT díly parních turbín. Další snižování ztrát je možné jen v případě optimalizace celého stupně, tedy i oběžných lopatek.

7. Poděkování

Autoři příspěvku děkují MPO České republiky za finanční podporu grantu FT-TA/085.

8. Použitá literatura

- Dejč, M.E., Zarjankin, A.E., Filippov, G.A. & Zacepin, M.F. (1960) Методы повышения к.п.д. ступеней турбины с малыми высотами лопаток. *Теплоэнергетика* №. 2, стр. 18-24.
- Chen, N., Xu, Y. & Hnang, W. (1997) Numerical Computations of Circumferentially Skewed Stator Bladings of SKODA by a 3-D Navier-Stokes Solver, *IET Chinese Academy of Science*.
- Vomela, J. & Milčák, P. (2005) Vývoj lopatek pro turbínové stupně s vysokou účinností II., *Výzkumná zpráva ZČU Plzeň*, KKE-14-05.
- Zarjankin, A.E., Paramonov, A.H., Fišer, E.R. & Rossichin, S.Ju. (2000) Экспериментальное исследование сопловых решеток с различной формой входных кромок. *Сборник научных трудов НАН Украины*, Харьков.