



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ



KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI



## JEDNOTLIVÝ PŘÍSPĚVEK ZE SBORNÍKU



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## MĚŘENÍ PRIZMATICKÉ LOPATKOVÉ MŘÍŽE NA AERODYNAMICKÉM TUNELU

**EPIKARIDIS Přemysl, SEDLÁK Kamil, ŠTĚCH Jaroslav**

*The results from measurement on the straight blade cascade are presented in the paper. The cascade is placed at the outlet of wind tunnel in ŠKODA POWER experimental base. The results in the form of velocity and loss fields behind blade cascade as well as the distribution of the loss coefficient in selected cross-section are evaluated.*

**Klíčová slova:** prizmatické lopatky, experiment, ztráty

### Úvod

Po delší odstávce byl znovu zprovozněn aerodynamický tunel, jenž je uzpůsoben k výzkumu přímých lopatkových mříží. V počáteční fázi bylo nutné vytipovat vhodnou lopatkovou mříž, již by bylo možné využít jako etalon pro další měření. Proto byla zvolena statorová prizmatická mříž typu VS 33. Významným faktorem pro toto rozhodnutí byl fakt, že existuje dostatečná databáze dat, k nimž je možné vztahovat nově získané výsledky a verifikovat je.

Ačkoliv měření na přímých lopatkových mřížích zcela neodráží realitu, která je výrazně komplikovanější a je možné ji lépe postihnout snad jen na vzduchových turbínách, je nutné si uvědomit, že i tato vývojová fáze lopatkových profilů má svůj smysl. Vlastní měření je řádově levnější a samozřejmě rychlejší. Navíc je možné studovat děje uvnitř mezilopatkových kanálů, které by na skutečné turbíně, popř. turbíně vzduchové, bylo možné studovat jen omezeně nebo vůbec. Také z tohoto důvodu je vhodné získané výsledky vztahovat k již známé lopatkové mříži.

Tunel je koncipován jako otevřený s měřicím prostorem umístěným na výstupu z nastavitelné konvergentní dýzy. Lopatková mříž skládající se ze čtveřice lopatek je osazena na prodlouženém výstupu z dýzy.

Jelikož aerodynamické parametry tunelu (Machovo a Reynoldsovo číslo) zdaleka nedosahují proudových parametrů, které se vyskytují na díle jsou modely lopatek tomuto přizpůsobeny. Jedná se především o geometrické měřítko lopatkového profilu. Délka lopatky je měnitelná v mezích od 150 do 300 mm, délka tětiny lopatky je  $b = 200$  mm. Provozní Reynoldsovo číslo lopatky je  $7,5 \cdot 10^5$ , Machovo isoentropické číslo zůstává na hodnotě 0,2. V prezentovaném případě byla délka lopatkové mříže nastavena na hodnotu 150 mm při poměrné rozteči  $t/b = 0,7$ .

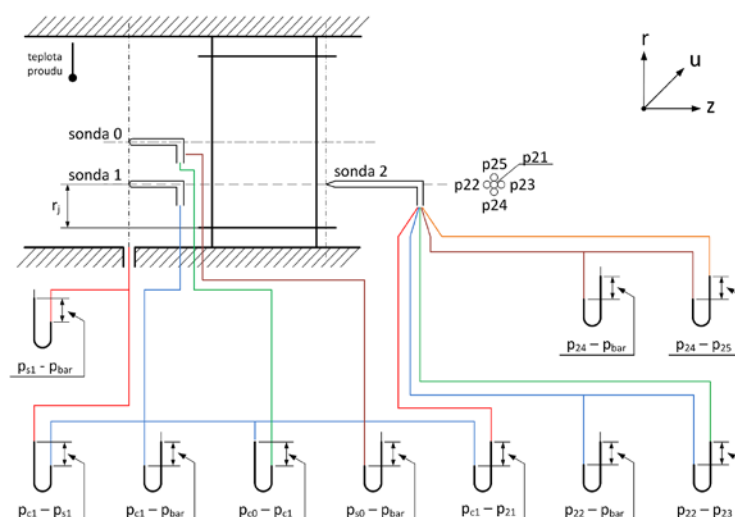
Zvolená koncepce tunelu umožňuje měřit zvolené charakteristiky lopatkové mříže v širokém rozsahu úhlu náběhu proudu na lopatkovou mříž. Další velkou výhodou je možnost zjišťovat proudové charakteristiky vybrané mříže v různých vzdálenostech za odtokovou hranu lopatkové mříže, ale také uvnitř mezilopatkového kanálu. Kromě toho je možné studovat sekundární proudění vznikající na omezujících stěnách. Právě tyto oblasti významným způsobem ovlivňují účinnost, resp. ztráty, celého lopatkového profilu.

## 2. Popis měření

Měření proudových charakteristik lopatkové mříže probíhalo na aerodynamickém tunelu v laboratořích podniku ŠKODA POWER, viz obr. 1. Popisované parametry tunelu jsou zajištěny axiálním ventilátorem JU 60, přičemž regulaci ventilátoru je možné řešit nastavením rozváděcích lopatek, popř. obtokem, který je bezprostředně za ventilátorem. Dle dostupných charakteristik dosahuje ventilátor stlačení 4400 Pa při průtočném množství 20 m<sup>3</sup>/s.



**Obr. 1:** Výstupní dýza tunelu osazená lopatkovou mříží



**Obr. 2:** Schéma měření

Měření charakteristik lopatkových mříží je založeno na konvenčním způsobu sběru dat z pneumatických sond rozmístěných před a za měřenou lopatkovou mříží, viz obr. 2.

Konkrétně se jedná o pevnou Prandtlovu sondu v rovině 0, což je rovina již za konvergentní dýzou. Z dat získaných v tomto bodě jsou vyhodnocovány nastavené parametry aerodynamického tunelu.

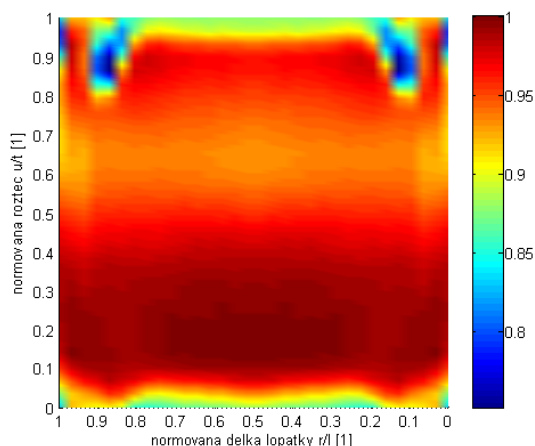
Dále je využito Pitotovy sondy v rovině 1, jejíž pohyb je svázán s 5-otvorovou sondou traverzující výstupní tlakové pole v rovině 2, což je rovina za lopatkovou mříží. Tato dvojice sond je ještě doplněna o odběr statického tlaku na stěně taktéž v rovině 1. Pro další vyhodnocení ztrátových součinitelů jsou stěžejní data získána právě z této dvojice sond.

Pro měření je využíván šestnáctikanálový inteligentní tlakový převodník NetScanner 9116, který komunikuje s měřicím počítačem prostřednictvím sítě Ethernet s využitím protokolu TCP/IP.

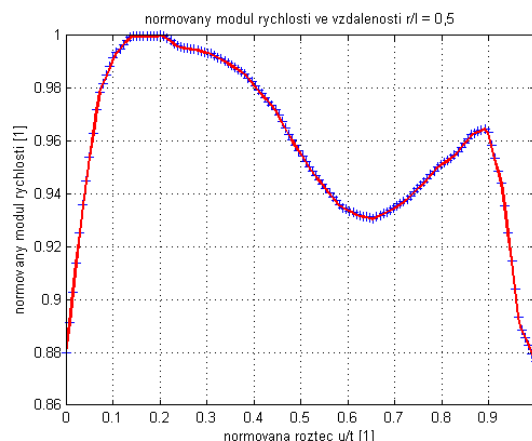
Dále byla vyhodnocována teplota proudu, atmosférický tlak a vlhkost vzduchu.

## 4. Výsledky

První z vyhodnocovaných veličin je rozložení rychlosti v rovině 2, viz obr. 3. Vše je zobrazeno v normovaném souřadném systému  $r/l - u/t$ , hodnota 0 na svislé ose odpovídá přetlakové straně lopatky, zatímco hodnota 1 odpovídá podtlakové straně lopatky. Hodnoty 0 a 1 na vodorovné ose odpovídají stěnám tunelu. Graf na obr. 4 je řezem plochy uvedené v levém obrázku v jeho středu délky kanálu, ve vzdálenosti  $z/b = 0,1$  za odtokovou hranou lopatek.



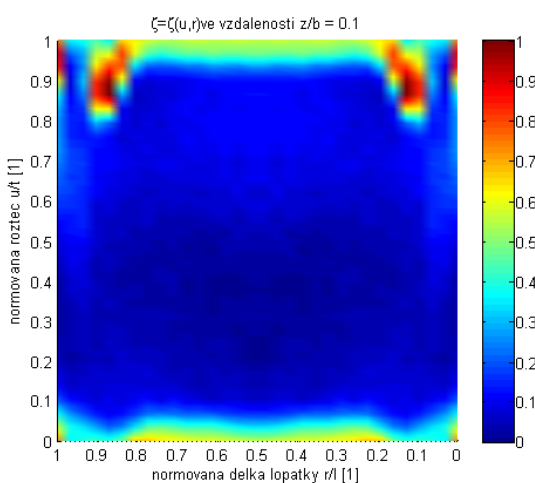
**Obr. 3:** Modul rychlosti ve vzdálenosti  $z/b = 0,1$  za odtokovou hranou lopatkové mříže



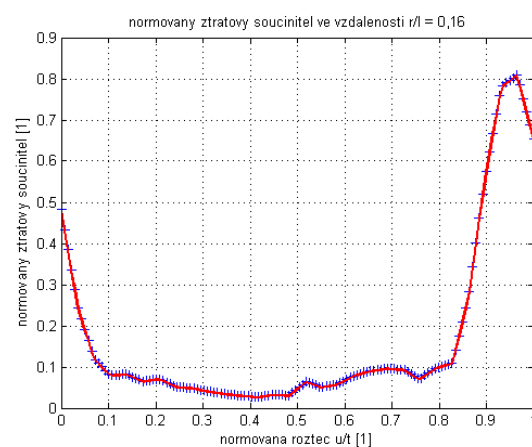
**Obr. 4:** Průběh modulu rychlosti ve středu kanálu ve vzdálenosti  $z/b = 0,1$  za odtokovou hranou

Z levého grafu jsou patrné víry vyvíjející se v okolí paty a špičky lopatky, které zasahují zhruba do čtvrtiny délky kanálu. Z tohoto je možné udělat závěr, že v intervalu  $r/l = \langle 0,25; 0,75 \rangle$  délky lopatky není proudění ovlivněno sekundárními ztrátami. Nicméně dochází k poklesu rychlosti na podtlakové straně lopatky, což by mohlo být dáno přítomností separační bubliny na hřbetu lopatky, případně mezí vrstvou o velké tloušťce.

Následující dvojice obrázků již ukazuje rozložení normovaného ztrátového součinitele ve stejném souřadném systému, viz obr. 5 a obr. 6.

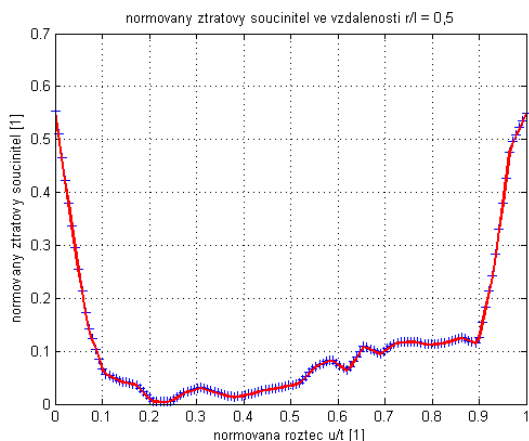


**Obr. 5:** Skalární pole ztrátového součinitele ve vzdálenosti  $z/b = 0,1$  za odtokovou hranou

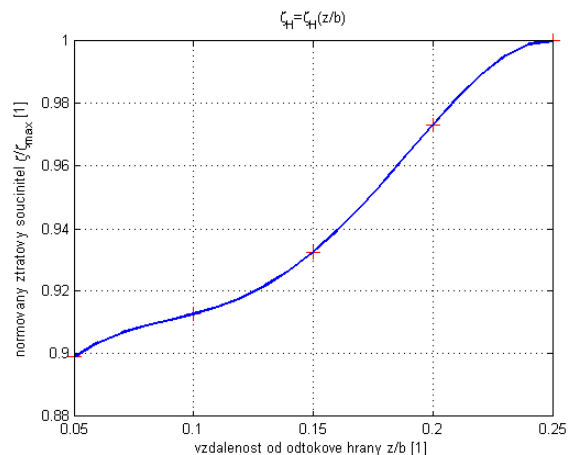


**Obr. 6:** Průběh ztrát přes rozteč v oblasti vírů

Za povšimnutí stojí, že maximálních hodnot dosahuje ztrátový součinitel právě v oblast u paty, popř. špičky lopatky, viz obr. 5. To je dáno koutovým vírem, který vzniká v rozích zhruba v polovině délky kanálu a prochází postupně celým kanálem od přetlakové strany k podtlakové. Pro lepší představu je skalární pole doplněno ještě klasickým dvourozměrným grafem, viz obr. 6, který popisuje rozložení ztrátového součinitele v oblasti  $r/l = 0,16$ . To je oblast, kde dominantní roli hrají zmiňované víry. Je patrné, že místní ztrátový součinitel je zhruba o 70% vyšší než ztrátový součinitel uprostřed kanálu. Pro srovnání je na obr. 7 uveden průběh normovaného ztrátového součinitele ve středu kanálu.



Obr. 7: Průběh ztrát ve středu kanálu



Obr. 8: Vývoj ztrát v axiálním směru za lopatkami

Poslední graf, viz obr. 8, ukazuje vliv vzdálenosti za odtokovou hranou lopatek na velikost ztrátového součinitele. Ukazuje se, že nevhodnou volbou měřicí roviny může docházet ke zvýšení hodnoty ztrátového součinitele až relativně o 10%. Zároveň nastává otázka, jakou axiální vzdálenost používat pro odhad predikce profilových ztrát v případě, že se vzdálenost lopatkových kol z konstrukčních či proudových důvodů mění. V současné době se používají výsledky z měření ve vzdálenosti  $z/b = 0,1$ , v budoucnu však bude nutné pravděpodobně tento údaj přehodnotit a zavést korekci na axiální vzdálenost stupňů.

## Závěr

Ve zprávě jsou uvedeny výsledky z měření prizmatické lopatkové mříže s profilem VS33. Byla provedena série měření v několika vzdálenostech za odtokovou hranou lopatkové mříže. Výsledkem jsou skalární a vektorová pole rychlosti, ztrátový součinitel v závislosti na vzdálenosti od odtokové hrany lopatek. Dalším krokem bude rozšíření měřených oblastí, zjišťování vlivu axiální vzdálenosti na ztráty a přechod k prostorově tvarovaným lopatkám.

## Literatura

- [1] BRICH, J.; ŠTASTNÝ, M.: Postup zpracování experimentálních dat výzkumu třírozměrného proudění nestlačitelné tekutiny rovinnou lopatkovou mříží turbínového typu a program AA5B, Výzkumná zpráva Škoda VVZ, 1977.
- [2] PEPRNÝ, J.; PEKÁREK, K.: Výstavba středorychlostního aerodynamického tunelu na lopatkové mříže, Výzkumná zpráva Škoda, 1965.

## Poděkování

Autoři příspěvku děkují za finanční podporu MPO grantu FR-TI3/432 „Komplexní vývoj přetlakového stupně s vysokou účinností“.

Bc. EPIKARIDIS Přemysl, ZČU v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení, Univerzitní 8, 30614 Plzeň, [premaepi@students.zcu.cz](mailto:premaepi@students.zcu.cz)

Ing. SEDLÁK Kamil, ŠKODA POWER, Tylova 1/57 301 28 Plzeň, 377 835 905, [kamil.sedlak@doosan.com](mailto:kamil.sedlak@doosan.com)

Ing. ŠTĚCH Jaroslav, ZČU v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení, Univerzitní 8, 30614 Plzeň, 377 638 140, [jstech@kke.zcu.cz](mailto:jstech@kke.zcu.cz)