

Vliv syntetizovaného paprsku na hodnotu celkového ztrátového součinitele v kompresorové lopatkové mříži *Influence of Synthetic Jet to the Compressor Blade Cascade Total Loss Coefficient*

Milan Matějka¹, Lukáš Popelka², Jiří Nožička¹

¹ Ústav mechaniky tekutin a energetiky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze

² Ústav termomechaniky, Akademie Věd České Republiky, Praha

Abstrakt: V příspěvku je presentován pozitivní vliv syntetizovaného paprsku (SP) na velikost celkového ztrátového součinitele kompresorové lopatkové mříže. Výstupní otvor generátoru syntetizovaného paprsku byl umístěn v boční stěně tunelu na spojnicí náběžných hran lopatek. Studován byl zejména vliv budící frekvence generátoru SP, dále hodnoty Stokesova a Reynoldsova čísla výstupního otvoru generátoru SP.

1. Úvod

Disipativní procesy při energetických přeměnách ve strojích nejsou ještě plně probádány, obzvláště je třeba doplnit problematiku energetické závislosti v proudě tekutiny se syntetizovaným proudem.

Dosavadní poznatky o syntetizovaných proudech ukazují, že jimi lze lokálně i globálně ovlivnit strukturu proudového pole. (např. vektorování proudu tekutiny, zvýšení intenzity transportu hmoty, apod.) Syntetizovaným paprskem lze vytvořit mezní vrstvu odolávající výraznějším nepříznivým tlakovým gradientům, aniž by došlo ke vzniku místního odtržení či odtržení mezní vrstvy. Aplikováním syntetizovaného paprsku na proud tekutiny můžeme výrazně zvýšit přenos hmoty a energie mezi proudem a okolní tekutinou.

2. Syntetizovaný paprsek

Syntetizovaný paprsek je ve srovnání s tradičním vyfukováním či odsáváním velice efektivní metoda řízení mezní vrstvy. Výstupní směr syntetizovaného paprsku z generátoru vůči povrchu či hranici dvou proudů není v tomto případě zásadní, *Yehoshua & Seifertt (2006)*. Nejvýraznějšího efektu lze dosáhnout při uspořádání, kdy paprsek je kolmý k hlavnímu proudě. Použití syntetizovaného paprsku je teoreticky velmi náročné a předpokládá dobrou znalost vlastností mezní vrstvy i syntetizovaného paprsku.

2.1. Faktory ovlivňující návrh generátoru syntetizovaného paprsku

Při návrhu generátoru syntetizovaného paprsku vycházíme z optimální hodnoty (viz. níže) bezrozměrné frekvence F^+ , rov. (1), dále ze znalosti rychlosti vnějšího proudu U a vzdálenosti X_{te} , tj. oblasti mezní vrstvy ovlivněné syntetizovaným paprskem (vzdálenost mezi výstupním otvorem generátoru syntetizovaného paprsku a např. odtokovou hranou lopatky). Z těchto hodnot lze získat budící frekvenci f syntetizovaného paprsku. Dále je třeba přihlídnout k hodnotám Reynoldsova, rov. (2), a Stokesova čísla, rov. (4), výstupního otvoru generátoru syntetizovaného paprsku.

$$F^+ = \frac{f \cdot X_{te}}{U_\infty}, \quad (1)$$

$$\text{Re}_o = \frac{u_o \cdot d_h}{\nu}, \quad (2)$$

kde u_o je střední výstupní rychlost ve výstupním otvoru generátoru syntetizovaného paprsku a U je rychlost okolního proudu tekutiny a $d_h = \frac{4 \cdot A}{O}$ je hydraulický průměr výstupního otvoru.

$$u_o = f \cdot L_0 = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} u_o(t) \cdot dt \quad (3)$$

$$\text{St} = \frac{f \cdot h^2}{\nu}, \quad (4)$$

kde h je výška štěrbinového výstupního otvoru (její nejmenší rozměr), f je frekvence paprsku a ν je kinematičká viskozita.

Pro stanovení intenzity paprsku, resp. účinnosti buzení, lze vycházet ze vztahu pro celkový koeficient hybnosti definovaného:

$$C_\mu = c_\mu + \langle c_\mu \rangle = \frac{2 \cdot h}{c} \cdot \left(\frac{\bar{U}_o}{U_\infty} \right)^2 + \frac{2 \cdot h}{c} \cdot \left(\frac{u_o}{U_\infty} \right)^2 \quad (5)$$

resp. pro $\langle c_\mu \rangle$ s uvažováním změny hustoty v ústí výstupního otvoru:

$$\langle c_\mu \rangle = \frac{\rho_o}{1/2 \rho_\infty U_\infty^2 c} \cdot \int_0^h u_o^2 dy \doteq \frac{\rho_o u_o^2 h}{1/2 \rho_\infty U_\infty^2 c}, \quad (6)$$

kde C_μ je celkový součinitel hybnosti, c_μ – část součinitele hybnosti dodané kontinuálním vyfukováním či odsáváním a $\langle c_\mu \rangle$ je fluktuální složka součinitele hybnosti. Dále U_∞ a ρ_∞ jsou rychlost a hustota tekutiny v nekonečnu, U_o , ρ_o jsou rychlost a hustota tekutiny pro ústí otvoru, h je charakteristický rozměr výstupního otvoru a c je charakteristický rozměr obtékaného tělesa (např. délka tělvy). Hodnota koeficientu C_μ se pohybuje v rozsahu od 0,0004 do 0,1.

Na tvar rychlostního profilu ve výstupním otvoru generátoru syntetizovaného paprsku má výrazný vliv hodnota Stokesova čísla. S klesajícím Stokesovým číslem se rychlostní profil ve výstupním otvoru buďže syntetizovaného paprsku blíží více laminárnímu. V případě vysokého Stokesova čísla se rychlostní profil blíží více obdélníkovému rychlostnímu profilu, tj. můžeme říci, že se jedná o proudění bez vlivu vazkosti, při jinak stejných podmínkách. Pro formování výrazných vírových struktur je vhodnější varianta první, tj. nízká hodnota Stokesova čísla.

Hodnota optima bezrozměrné frekvence F^+ , uvažujeme-li oddálení turbulentního odtržení, leží v blízkém okolí hodnoty 1,2, resp. velmi často je uváděn interval přibližně

od 1 do 10, např. *Greenblatt & Wygnanski (2000)*, *Glezer & Amitay (2002)*. V závislosti na změně hodnoty bezrozměrné frekvence F^+ dochází k výrazným změnám minimální velikosti hodnoty celkového koeficientu hybnosti C_μ (resp. flukтуаční složky koeficientu hybnosti $\langle c_\mu \rangle$, protože v případě syntetizovaného paprsku existuje pouze flukтуаční složka koeficientu hybnosti) a tím také celkové účinnosti (s ohledem na dodanou energii).

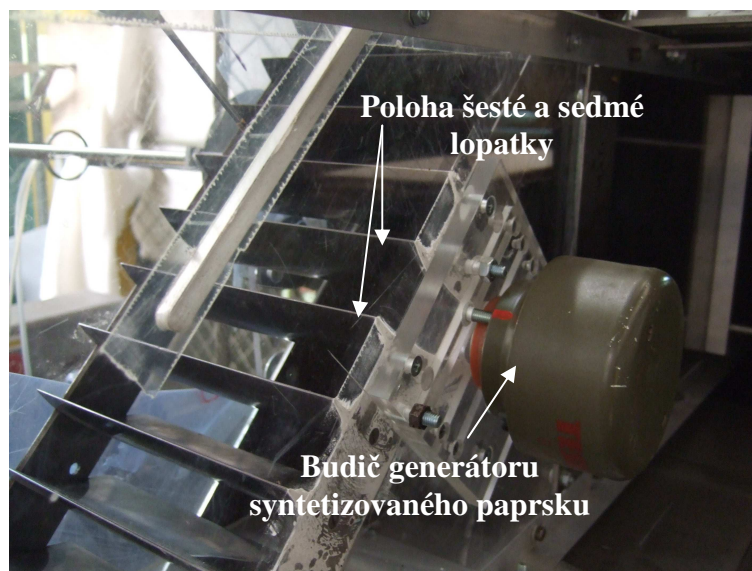
3. Experimentální ověření vlivu syntetizovaného paprsku na proudové pole lopatkové mříže

3.1. Umístění generátoru syntetizovaného paprsku

Pro ověření vlivu syntetizovaného paprsku na proudové pole tekutiny uvnitř lopatkové mříže byl použit model s těmito parametry:

- těřiva lopatky $c = 72$ mm,
- poměrná rozteč lopatek $s/c = 0,5$,
- úhel nastavení lopatky v lopatkové mříži $\gamma = 90^\circ$,
- šřtřhlost lopatky $\lambda = h/c = 2,22$,
- vstupní úhel náběhu $\alpha = 5^\circ$.

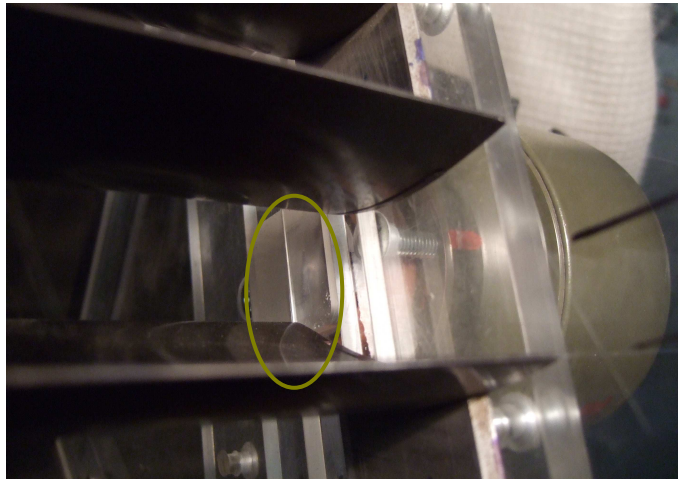
Lopatková mřřž byla umístěna v nřzkorychlostním aerodynamickém tunelu s měřřícím prostorem o rozměrech: šřřka $b = 160$ mm a výřška $l = 300$ mm. Rychlost proudu na vstupu do lopatkové mřřže umístěné v měřřícím prostoru tunelu 44 m/s.



Obr. 1 Umístění generátoru syntetizovanėho paprsku

Na levé stěně tunelu ve směru proudu mezi 6 a 7 lopatkou (obr. 1) byl na spojnicı náběžných hran lopatek umístěn výstupní otvor generátoru syntetizovanėho paprsku (obr. 2). Šřřka výstupního otvoru generátoru je rovna rozteči lopatkové mřřže, tj. $s = 36$ mm. Aby bylo možné zohlednit vliv zejména Stokesova čřřsly otvoru, byla výřška výstupního otvoru h (šřřerbiny) nastavena na řřı hodnoty – 1, 0,5 a 0,2 mm,

Syntetizovaný paprsek byl generován na frekvencích $f = 600, 800, 1000$ a 1200 Hz. Budící frekvence a rozměr výstupního otvoru generátoru syntetizovaného paprsku byly určeny pomocí rovnic (1) až (6). Pro určení rozsahu budících frekvencí byly rozhodující: velikosti tětivy lopatky c , rozteč lopatek s a rychlost nabíhajícího proudu U . Vzhledem k velkému rozsahu budících frekvencí a požadavku na dostatečnou velikost flukтуаční složky součinitele hybnosti $\langle c_\mu \rangle$, byla zvolena konstrukce generátoru syntetizovaného paprsku s elektrodynamickým budičem.



Obr. 2 Umístění výstupního otvoru generátoru syntetizovaného paprsku na spojnicí náběžných hran lopatek

Elektrodynamický budič generátoru syntetizovaného paprsku byl buzen sinusovým signálem. Signál byl generován univerzální měřicí kartou National Instruments PCI 6251 a zesílen na hodnotu konstantního proudu 200 mA (při impedanci budiče 8Ω je příkon 320 mW). Pro všechny zmíněné varianty frekvencí i výstupních otvorů byl použit stejný příkon.

Pro srovnání účinnosti syntetizovaného paprsku byly pro všechny budící frekvence a velikosti šterbiny změřeny průběhy rychlosti 1 mm od stěny resp. výstupního otvoru generátoru. Pro určení rychlosti byla použita metoda žhaveného drátku (Mini CTA firmy Dantec s jednodrátkovou sondou). Měření proběhlo ve třech polohách šířky b výstupního otvoru. Z naměřených rychlostí ve výstupním otvoru budiče, byla spočtena střední rychlost (uvažována pouze kladná složka průběhu rychlosti, část s vyšší hodnotou průběhu, a vypočtena flukтуаční složka koeficientu hybnosti $\langle c_\mu \rangle$ pro rychlost hlavního proudu v lopatkové mříži $U = 44$ m/s (tab. 2).

f [Hz] \ h [mm]	0,2	0,5	1
300	17,4	18,6	-
600	18,1	18,3	8,0
800	15,9	16,7	6,9
1000	12,8	15,3	7,6
1200	9,1	12,9	7,6

Tab. 1 Výstupní rychlost ve vzdálenosti $y/h \cong 1$ nad otvorem generátoru syntetizovaného paprsku pro dané budící frekvence a velikosti šterbin.

f [Hz] \ h [mm]	0,2	0,5	1
300	0,087	0,248	-
600	0,094	0,240	0,091
800	0,072	0,199	0,069
1000	0,047	0,169	0,084
1200	0,024	0,119	0,082

Tab. 2 Flukтуаční složka koeficientu hybnosti $\langle c_\mu \rangle$ (v %) vypočtená z rychlosti hlavního proudu v lopatkové mříži $U=44$ m/s a tětivy lopatky c .

Nejnižších hodnot flukтуаční složka koeficientu hybnosti $\langle c_\mu \rangle$ nabývá pro štěrbinu o výšce $h = 0,2$ mm a nejvyšší frekvence tj. $f = 1000$ a 1200 Hz. Nejvyšších hodnot flukтуаční složka koeficientu hybnosti $\langle c_\mu \rangle$ nabývá pro slot o šířce štěrbinu $0,5$ mm a frekvence 300 a 600 Hz (tab. 2). Hodnota bezrozměrné frekvence F^+ vztažená k těživě lopatky (první odhad pro určení charakteristiky syntetizovaného paprsku a jeho generátoru) a rozteči lopatek je vyjádřena v tab. 3. Rozhodující pro určení hodnoty bezrozměrné frekvence je charakteristický rozměr, jak je patrné z tab. 3. V tab. 4 a 5 jsou uvedeny hodnoty Stokesova a Reynoldsova čísla výstupního otvoru. Reynoldsovo číslo zůstává pro všechny varianty řádově stejné. Hodnoty Stokesova čísla se blíží jedné pro nejmenší výšku štěrbinu.

f [Hz]	c	s
300	0,49	0,25
600	0,98	0,49
800	1,31	0,65
1000	1,64	0,82
1200	1,96	0,98

Tab. 3 Hodnota bezrozměrné frekvence F^+ vztažená k těživě c a rozteči s .

f [Hz] \ h [mm]	0,2	0,5	1
300	0,8	5	-
600	1,6	10	40
800	2,1	13,3	53,3
1000	2,7	16,7	66,7
1200	3,2	20	80

Tab. 4 Hodnota Stokesova čísla ve výstupním otvoru generátoru syntetizovaného paprsku.

f [Hz] \ h [mm]	0,2	0,5	1
300	230,5	610,7	-
600	240,0	601,4	517,0
800	210,3	547,7	448,2
1000	169,8	503,9	495,4
1200	120,6	423,8	490,5

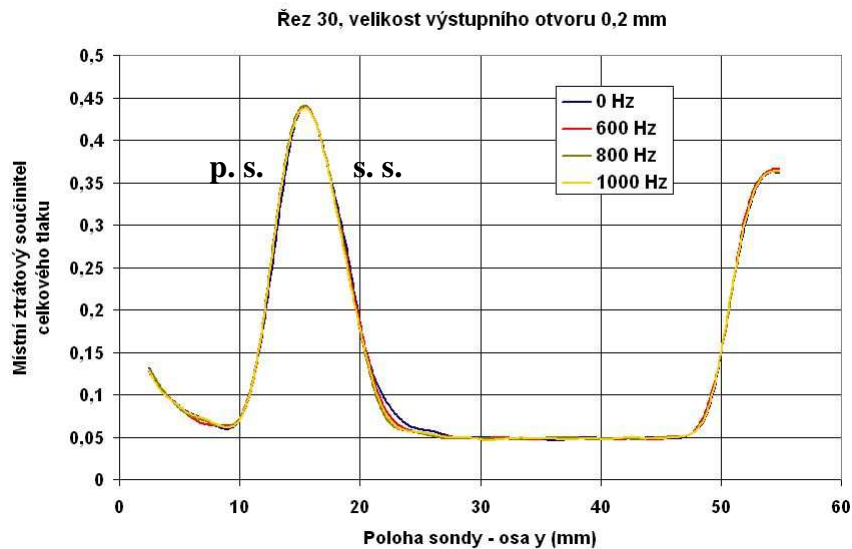
Tab. 5 Hodnota Reynoldsova čísla ve výstupním otvoru generátoru syntetizovaného paprsku.

3.2. Experimentální určení hodnoty ztrátového součinitele

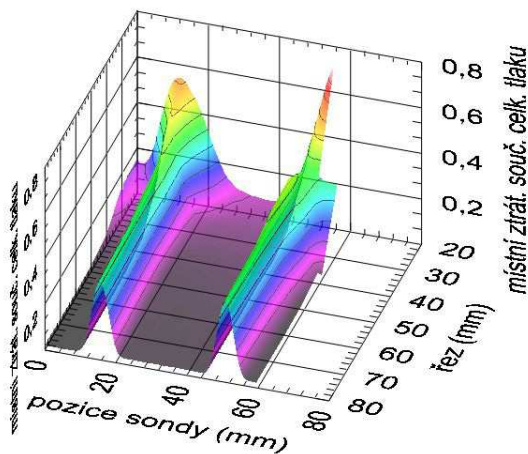
Pro všechny frekvence a velikosti štěrbinu bylo změřeno 6 řezů podél rozpětí lopatky (osa z) ve vzdálenostech $20, 30, 40, 50, 60$ a 80 mm od boční stěny tunelu. Ze získaných dat byly vypočteny hodnoty místního ztrátového součinitele a z nich určen v závislosti na frekvenci a velikosti štěrbinu výstupního otvoru generátoru syntetizovaného paprsku celkový ztrátový součinitel a sekundární ztrátový součinitel lopatkové mříže. Hodnoty celkového ztrátového součinitele normované hodnotou celkového ztrátového součinitele bez buzení jsou uvedeny v tab. 6 s procentuálním vyjádřením v tab. 7. Hodnoty sekundárního ztrátového součinitele normované hodnotou sekundárního ztrátového součinitele bez buzení jsou uvedeny v tab. 8 s procentuálním vyjádřením v tab. 9.

Na obr. 3 je vynesena průběh místního ztrátového součinitele celkového tlaku podél rozpětí lopatek 6 a 7 (osa y), ve vzdálenosti 30 mm od stěny tunelu (osa z). Mezi polohami sondy 20 a 30 mm (osa y) je stále patrný vliv syntetizovaného paprsku na velikost místního ztrátového součinitele celkového tlaku. Složením všech řezů bylo získáno rozložení místního ztrátového součinitele celkového tlaku ve vzdálenosti 40 mm za odtokovou hranou lopatky, přes poloviční rozpětí (délku) lopatky, obr. 4. Osa

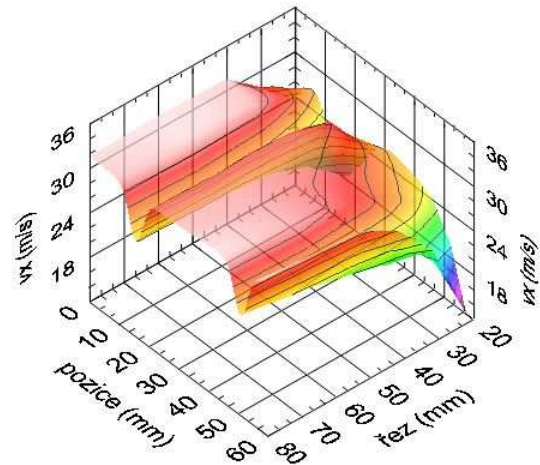
řez (osa z, dle obr. 4) představuje vzdálenost od boční stěny tunelu v mm, osa poloha představuje polohu sondy vůči odtokové hraně lopatky (osa y, dle obr. 4) – rozteč lopatek. Na obr. 5 až 7 jsou zobrazeny hodnoty složek rychlosti ve směru všech tří os x, y a z, ve vzdálenosti 40 mm za odtokovou hranou lopatky.



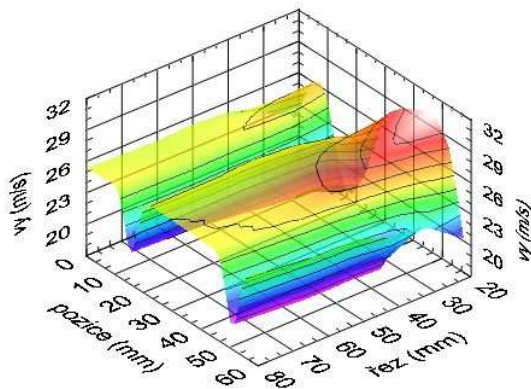
Obr. 3 Průběh místního ztrátového součinitele celkového tlaku, řez 30, velikost výstupního otvoru 0,2.



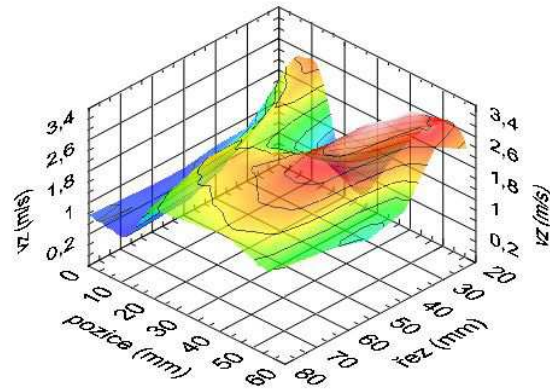
Obr. 4 Rozložení místního ztrátového součinitele celkového tlaku za lopatkovou mříž (f = 0 Hz).



Obr. 5 Rozložení složky rychlosti v_x za lopatkovou mříž (f = 0 Hz).



Obr. 6 Rozložení složky rychlosti v_y za lopatkovou mříží, ($f = 0$ Hz).



Obr. 7 Rozložení složky rychlosti v_z za lopatkovou mříží, ($f = 0$ Hz).

štěrbina \ f [Hz]	0	600	800	1000
0,2	1	0,9912	0,9851	0,9819
0,5	1	1,0164	1,0043	0,9967
1	1	1,0114	0,9964	0,9973

Tab. 6 Normované hodnoty celkového ztrátového součinitele pro dané frekvence a velikosti výstupního otvoru generátoru

štěrbina \ f [Hz]	0	600	800	1000
0,2	1	0,9606	0,9471	0,9428
0,5	1	1,0214	0,9938	0,9749
1	1	1,009	0,9766	0,9806

Tab. 8 Normované hodnoty sekundárního ztrátového součinitele pro dané frekvence a velikosti výstupního otvoru generátoru

štěrbina \ f [Hz]	0	600	800	1000
0,2	0	-0,88	-1,49	-1,81
0,5	0	1,64	0,43	-0,33
1	0	1,14	-0,36	-0,27

Tab. 7 Změna hodnoty celkového ztrátového součinitele v %

štěrbina \ f [Hz]	0	600	800	1000
0,2	0	-3,94	-5,29	-5,72
0,5	0	2,14	-0,62	-2,51
1	0	0,90	-2,34	-1,94

Tab. 9 Změna hodnoty sekundárního ztrátového součinitele v %

4. Diskuze výsledků

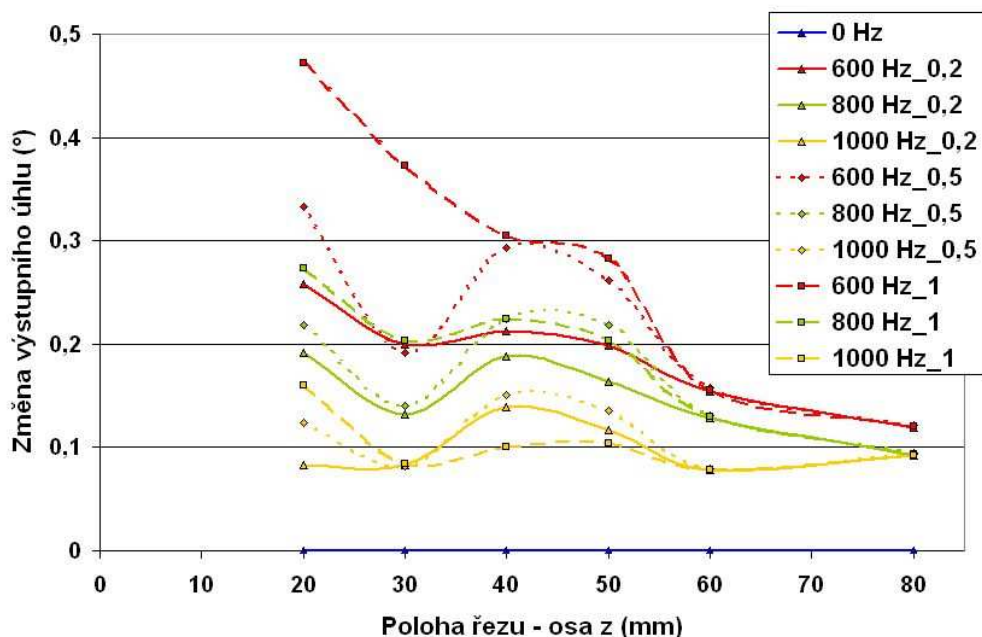
4.1. Umístění generátoru syntetizovaného paprsku a jeho vliv na proudové pole mezilopatkového kanálu

Vzhledem k obtížnému řešení zabudování generátoru syntetizovaného paprsku přímo do lopatky, byl generátor umístěn pouze v jedné boční stěně tunelu mezilopatkového kanálu na spojnici náběžných hran lopatek. Vliv na velikost celkového (sekundárního) ztrátového součinitele takto umístěného generátoru syntetizovaného paprsku velmi silně závisí na štíhlosti použitých lopatek, protože syntetizovaný paprsek má v této poloze dopad pouze na část proudového pole v blízkosti boční stěny tunelu. Pokud by se podařilo umístit generátor syntetizovaného paprsku přímo do lopatky

(podél celého rozpětí lopatky), došlo by k dalšímu výraznějšímu snížení hodnoty celkového ztrátového součinitele, resp. zejména ke snížení profilových ztrát.

Poněkud složitější se jeví zhodnocení vlivu dvou na sebe vzájemně kolmých syntetizovaných paprsků, generovaných na lopatce a v boční stěně tunelu. Je pravděpodobné, že v tomto případě může dojít ke vzniku výrazných vírových struktur, což je jistě nežádoucí. Výzkum v oblasti interakce na sebe vzájemně kolmých syntetizovaných paprsků nebyl dosud publikován a jistě si v budoucnu zaslouží naši bližší pozornost. Velmi zajímavé se jeví také téma interakce vzájemně kolmých syntetizovaných paprsků generovaných různou frekvencí.

Přestože řízení mezní vrstvy bylo aplikováno pouze na malé části mezilopátkového kanálu (boční stěna tunelu), byl prokázán výrazný dopad syntetizovaného paprsku na proudové pole mezilopátkového kanálu. Došlo k nezanedbatelnému poklesu hodnoty celkového i sekundárního ztrátového součinitele o 1,8 %, resp. 5,7 %. Z měření pneumatickou sondou nebyla zjištěna výrazná změna deviace proudu za lopátkovou mříží (obr. 8), což je způsobeno velkou vzdáleností sondy od stěny, kde je vliv syntetizovaného paprsku méně výrazný. Na obr. 8 je vyneseno rozdílné deviace proudu mezi stavem s buzením a bez buzení, ovšem vzhledem k velikosti chyby měření výstupního úhlu $\alpha_2(z)$ (resp. deviace δ), když $\kappa_{\alpha_2} = \pm 0,3^\circ$, není diskuze získaných dat zcela vypovídající. Patrná je výraznější změna výstupního úhlu v blízkosti stěny pro frekvenci $f = 600$ a 800 Hz a velikost štěrbin 1 a 0,5 mm.



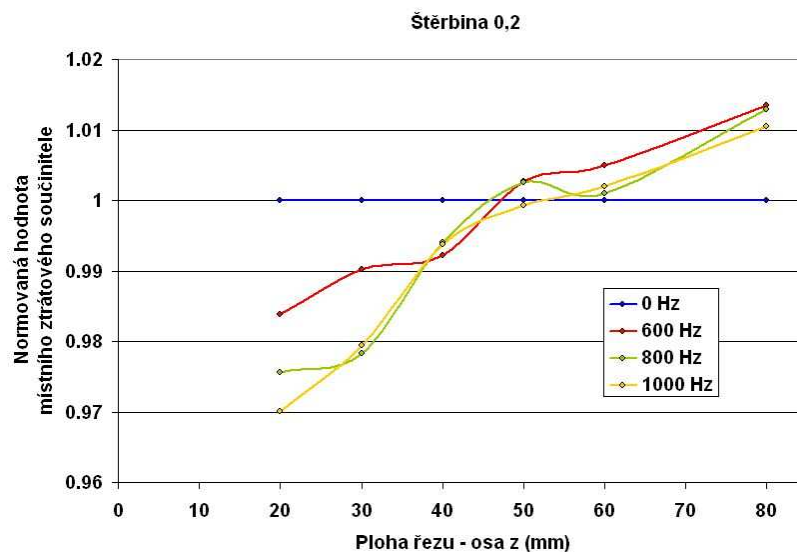
Obr. 8 Vliv syntetizovaného paprsku na změnu deviace proudu δ v závislosti na budící frekvenci a velikosti štěrbin.

Na pokles hodnoty celkového ztrátového součinitele má výrazný vliv jak velikost štěrbin (výška výstupního otvoru) resp. hodnota Stokesova čísla, tak hodnota budící frekvence generátoru syntetizovaného paprsku. S rostoucí frekvencí hodnota ztrátového součinitele klesá (tab. 6 a 8). Účinek výšky výstupního otvoru (Stokesova čísla) je patrný v tab. 6 a 8, kde je zřejmý pokles celkového (sekundárního) součinitele odporu mezi hodnotami výšky výstupního otvoru 1, 0,5 a 0,2 mm. Změna hodnoty ztrátového

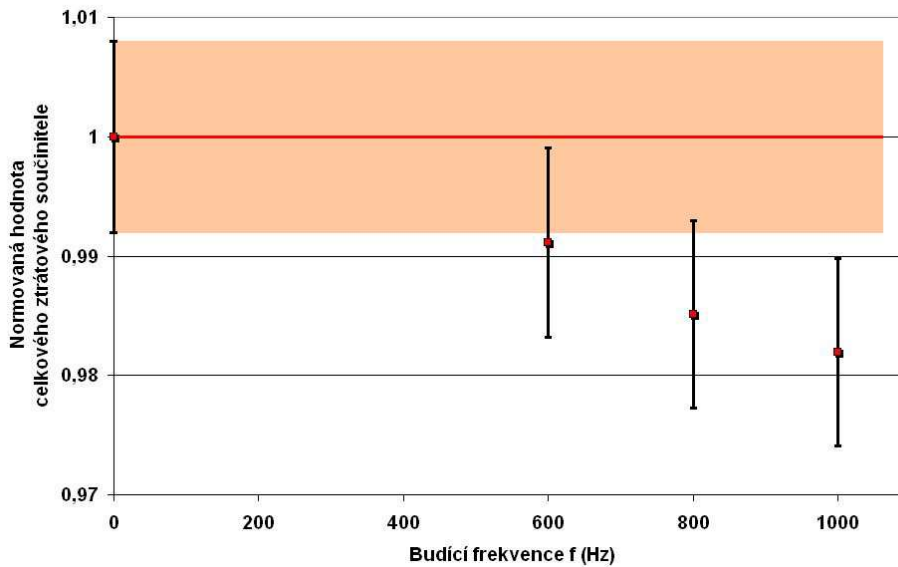
součinitele pro výšku výstupního otvoru 1 a 0,5 mm je v rámci chyby měření a proto nelze s určitostí učinit jasný závěr (tab. 6 a 8). Zajímavý je nárůst celkového (sekundárního) ztrátového součinitele pro frekvenci 600 Hz a velikosti výstupního otvoru 0,5 a 1 mm. S ohledem na hodnotu Stokesova čísla lze konstatovat, že výraznějšího efektu na hodnotu ztrátového součinitele bylo dosaženo pro nízké hodnoty Stokesova čísla.

Základním předpokladem pro stanovení dopadu syntetizovaného paprsku na proudové pole je velikost chyby měření. Chyba měření celkového (sekundárního) ztrátového součinitele je 0,8 % z jeho absolutní hodnoty. Na obr. 9 jsou vyneseny hodnoty místního ztrátového součinitele (pro daný řez) podél rozpětí lopatky pro výšku výstupního otvoru 0,2 mm. Patrný je výrazný pokles místního ztrátového součinitele v blízkosti stěny tunelu, způsobený vlivem syntetizovaného paprsku. Nárůst hodnoty místního ztrátového součinitele v polovině rozpětí lopatky pro případy s buzením je zřejmě způsoben generováním syntetizovaného paprsku pouze na jedné stěně tunelu.

Z hodnot místních ztrátových součinitelů byly spočteny hodnoty celkového ztrátového součinitele (viz. tab. 6). Na obr. 10 jsou vyneseny normované hodnoty celkového ztrátového součinitele pro výšku výstupního otvoru 0,2 mm a porovnány hodnoty bez buzení a s buzením i s ohledem na velikost chyby měření. Velikost chyby celkového ztrátového součinitele je menší než naměřená změna a lze tedy potvrdit nezanedbatelný účinek syntetizovaného paprsku na proudové pole v blízkosti stěny tunelu.



Obr. 9 Průběh místního ztrátového součinitele podél rozpětí lopatky, výška výstupního otvoru 0,2



Obr. 10 Normované hodnoty celkového ztrátového součinitele pro budící frekvence 0 až 1000 Hz se štěrbinou 0,2 mm se zahrnutím chyby měření (tab. 6, kap. 5.6.).

V tab. 10 je uvedeno srovnání velikosti sekundárních ztrát teoretických $\bar{\zeta}_{3D_{teor.}}(f)$, rov. (7), a skutečných $\bar{\zeta}_{3D_{skut.}}(f)$ pro štěrbinu o velikosti 0,2 mm. Je patrné, že maximální úspore celkových ztrát $\bar{\zeta}_T$ o cca 1,8 % odpovídá teoretický maximální pokles sekundárních ztrát $\bar{\zeta}_{3D_{teor.}}(1000)$ cca o 4,3 %. Maximální rozdíl mezi teoretickou a skutečnou hodnotou sekundárních ztrát činí cca 1,5 %, což je zřejmě způsobeno mírným snížením profilových ztrát díky menšímu zavření v koutu mezi lopatkou a boční stěnou tunelu a částečně také chybou měření.

$$\bar{\zeta}_{3D_{teor.}}(f) = \bar{\zeta}_T(f) - [\bar{\zeta}_T(0) - \bar{\zeta}_{3D}(0)] \quad (7)$$

$$\bar{\zeta}_{3D_{teor.}}(f)[\%] = \frac{\bar{\zeta}_{3D_{teor.}}(f) - \bar{\zeta}_{3D}(0)}{\bar{\zeta}_{3D}(0)} \quad (8)$$

$$\bar{\zeta}_{3D_{skut.}}(f)[\%] = \frac{\bar{\zeta}_{3D_{skut.}}(f) - \bar{\zeta}_{3D}(0)}{\bar{\zeta}_{3D}(0)} \quad (9)$$

ztráty \ f [Hz]	0	600	800	1000
$\bar{\zeta}_T(0) - \bar{\zeta}_{3D}(0)$	0,1342	0,1342	0,1342	0,1342
$\bar{\zeta}_{3D_{teor.}}(f)$	0,0979	0,0958	0,0944	0,0937
$\bar{\zeta}_{3D_{teor.}}(f)[\%]$	0	-2,1	-3,5	-4,3
$\bar{\zeta}_{3D_{skut.}}(f)$	0,0979	0,094	0,0927	0,0923
$\bar{\zeta}_{3D_{skut.}}(f)[\%]$	0	-3,9	-5,3	-5,7

Tab. 10 Porovnání změny velikosti teoretických a skutečných sekundárních ztrát, velikost výstupního otvoru generátoru syntetizovaného paprsku 0,2 mm

Velmi důležité je zhodnocení vlivu syntetizovaného paprsku na proudové pole z hlediska energetických přeměn. Z hodnoty celkového ztrátového součinitele a rychlosti proudu na vstupu do lopatkové mříže lze určit ztrátovou měrnou práci hlavního proudu tekutiny, dle vztahu (10). Potom z rozdílu hodnot celkového ztrátového součinitele bez a s vlivem syntetizovaného paprsku lze vyjádřit uspořeno měrnou práci, dle vztahu (11).

$$w_z = \bar{\zeta}_T \cdot \frac{1}{2} \cdot U_\infty^2 \quad (10)$$

$$w_{us} = (\bar{\zeta}_T(0) - \bar{\zeta}_T(f)) \cdot \frac{1}{2} \cdot U_\infty^2 \quad (11)$$

Poměr přivedeného elektrického příkonu P a hmotnostního toku proudu tekutiny v mezilopatkovém kanále určuje velikost měrné přivedené práce, rov. (12). Z poměru měrné uspořené a přivedené práce lze definovat efektivitu syntetizovaného paprsku η_{sp} na proudové pole tekutiny, rov. (13). Efektivita syntetizovaného paprsku tak vyjadřuje, kolikrát více vložené energie bylo uspořeno. V tab. 11 jsou uvedeny hodnoty efektivit syntetizovaného paprsku pro jednotlivé případy velikosti štěrbin a budící frekvence. Pro štěrbinu o velikosti 0,2 mm a budící frekvenci $f = 1000$ Hz bylo uspořeno cca 4 krát více energie, než bylo vloženo.

$$w_{dod} = \frac{P}{\dot{m}} \quad (12)$$

$$\eta_{sp} = \frac{w_{us}}{w_{dod}} \quad (13)$$

štěrbinu / f [Hz]	0	600	800	1000
0,2	0	1,87	3,14	3,82
0,5	0	-3,43	-0,91	0,69
1	0	-2,54	0,80	0,61

Tab. 11 Efektivita syntetizovaného paprsku η_{sp} pro všechny případy velikosti slotu a frekvencí.

5. Závěr

Z experimentálních výsledků vyplývá výrazný vliv budící (resp. bezrozměrné) frekvence a Stokesova čísla výstupního otvoru generátoru syntetizovaného paprsku na hodnotu ztrátového součinitele.

Protože na boční stěně tunelu došlo k ovlivnění nejen mezní vrstvy, ale také vírových struktur, jeví se volba charakteristického rozměru (paprskem ovlivněné oblasti) pro výpočet bezrozměrné frekvence poněkud problematická.

Na snížení hodnoty ztrátového součinitele má také výrazný vliv umístění výstupního otvoru generátoru syntetizovaného paprsku, který byl v tomto případě umístěn v boční stěně tunelu, kdy došlo zejména k poklesu hodnoty sekundárního ztrátového součinitele. Je zřejmé, že pokud by se podařilo zabudovat generátor syntetizovaného paprsku přímo do lopatky (podél celého rozpětí lopatky) došlo by k výraznějšímu poklesu profilových ztrát a následně tak celkového ztrátového součinitele.

Mnohem vhodnější metodou snížení profilových ztrát je použití pokročilejší metody řízení mezní vrstvy, řízení plazmatem. Použití této metody k řízení mezní vrstvy na lopatce je z technologických důvodů mnohem jednodušší než v případě syntetizovaného paprsku.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory grantového projektu GA ČR 101/05/2537 a Výzkumného centra MŠMT 1M06059. Zvláštní poděkování za podmětné připomínky patří Prof. Ing. Pavlu Šafaříkovi, CSc.

6. Literatura

- Cannelle F., Amitay M. (2005): *Synthetic Jets: Spatial Evolution and Transitory Behavior*. AIAA 2005 – 0102.
- Gad-El-Hak, M. (2000): *Flow Control*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gallas, Q., Mathew, J. Kaysap, A., Holman, R., Nishida, T., Carroll, B., Sheplak, M., Cattafesta, L. (2002): *Lumped Element Modeling of Piezoelectric-Driven Synthetic Jet Actuators*. AIAA 2002-0125.
- Glezer, A., Amitay, M. (2002): *Synthetic Jet*. Annual Revision Fluid Mechanics 2002.
- Greenblatt D., Wygnanski I. J. (2000): *The Control of Flow Separation by Periodic Excitation*. Aerospace Science 36 (2000), pp. 487-554.
- Grundmann S., Klumpp S., Tropea C. (2006): *Stabilizing a Laminar Boundary-Layer Using Plasma-Actuator*. 25th ICAS, Hamburg.
- Matějka, M. (2003): *Měření parametrů proudového pole za přímou lopatkovou mříží*. XXII. mezinárodní vědecká konference kateder a pracovišť mechaniky tekutin a termomechaniky. Technická univerzita Liberec, str. 97–102.
- Matějka, M., Popelka, L. (2006): *The Study of Influence of Active and Passive Methods of Boundary Layer Control*. Experimental Fluid Mechanics 2006, Technical University Liberec, str. 115-122.
- Matějka, M., Součková, N., Popelka, L., Nožička, J. (2007): *Active flow control on the simplified flapped airfoil*. 1st CEAS European Air and Space Conference, Berlin, p. 237–241.
- Smith, B.L., Swift, G.W. (2003): *A Comparison between Synthetic Jets and Continuous Jets*. Experiments in Fluids, 34, 467–472.
- Uruba, V. (2004): *Flow Control Using Synthetic Jet Actuators*. Inženýrská Mechanika 2004, Praha.
- Uruba, V., Matějka, M. (2004): *On the Receptivity of a Free Shear Layer to Synthetic Jet Excitation*. Colloquium FLUID DYNAMICS 2004. Academy of Sciences of the Czech Republic, Institute of Thermomechanics, Prague 2004, str. 201–204.
- Yehoshua, T., Seifert, A. (2006): *Active Boundary Layer Tripping Using Oscillatory Vorticity Generator*. Aerospace Science and Technology.