

VLIV AMPLITUDOVÉ MODULACE SYNTETIZOVANÉHO PROUDU NA SOUČINITELE ODPORU A VZTLAKU PŘI OBTÉKÁNÍ VÁLCE

Milan Matějka, Petr Pick
České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní, Praha

V příspěvku je presentován vliv amplitudové modulace syntetizovaného paprsku (proudu) na součinitele odporu a vztlaku při obtékání válce. Je zde shrnut vliv Strouhalova čísla (F^+), Stokesova čísla výstupního otvoru (St_o) a Reynoldsova čísla (Re). Použitá základní nosná frekvence byla sinového typu, modulační frekvence obdélníkového typu s poměrem 50%.

Úvod

Použití syntetizovaného paprsku na snížení odporu, zvýšení vztlaku či přenosu tepla je věnováno velké množství publikací zahraničních i tuzemských autorů např. [1, 2, 3]. Generátor syntetizovaného paprsku je jednoduché zařízení, které lze popsat jako dutinu s oscilující membránou a výstupním otvorem, v jehož ústí je syntetizovaný paprsek generován, [4].

Design generátoru syntetizovaného paprsku je podmíněn maximalizací intenzity výstupního proudu při minimalizaci energie nutné k jeho provozu. Z tohoto požadavku je zřejmá snaha provozovat generátor syntetizovaného paprsku na některé z rezonančních frekvencí (dutiny či membrány), [4, 5]. Nicméně účinnost řízení mezní vrstvy nezávisí pouze na intenzitě syntetizovaného paprsku vyjádřené součinitelem hybnosti c_μ (1), ale také na bezrozměrné frekvenci buzení – Strouhalovo číslo F^+ (4), resp. na frekvenci syntetizovaného paprsku a také na Stokesově čísle výstupního otvoru St_o , (5). Se změnou velikosti Reynoldsova čísla Re dochází ke změně hodnot Strouhalova čísla F^+ , což při zachování konstantní excitační frekvence budiče vede ke snížení efektivity řízení mezní vrstvy. Obdobně v případě Stokesova čísla výstupního otvoru St_o , (2), blíže viz [5]. Velmi důležitou informací je, zda hodnota jednotkové práce dodané w_{in} je menší než hodnota jednotkové práce uspořené w_{us} , protože v případě, kdy do systému investujeme více energie, než uspoříme, postrádá takový koncept smysl. V případě obtékání válce lze toto vyjádřit obdobně jako v [1, 7].

$$c_\mu = \frac{\rho_o \cdot u_o'^2 \cdot h}{1/2 \cdot \rho_\infty \cdot U_\infty^2 \cdot D} \quad (1)$$

$$\text{kde } u_o' = \frac{\sqrt{\int_0^h \bar{u}_o(y)^2 dy}}{h} \quad (2)$$

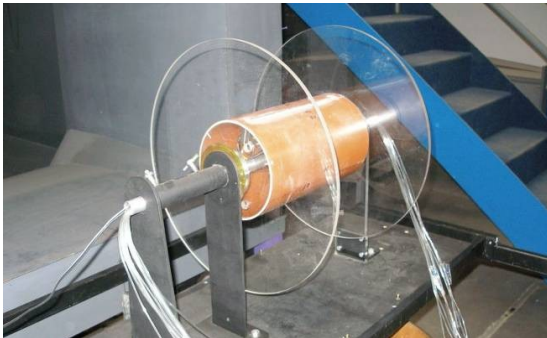
$$\text{a } \bar{u}_o = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} u_o(t) \cdot dt \quad (3)$$

$$F^+ = \frac{f \cdot D}{U_\infty} \quad (4)$$

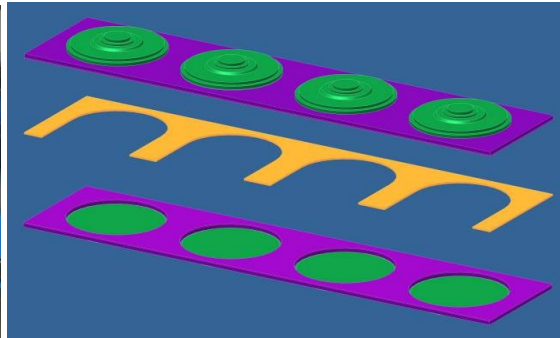
$$St_o = \frac{f \cdot h^2}{\nu} \quad (5)$$

Model a experimentální zařízení

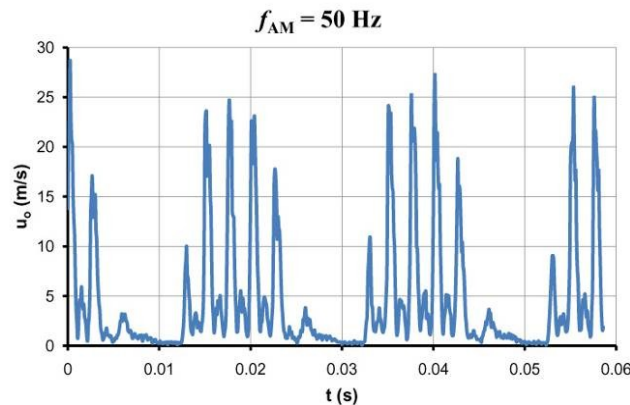
Modelem je válec o průměru $D = 161\text{mm}$ o délce $l = 275\text{mm}$ s koncovými deskami, viz. obr. 1. Ve střední části válce je po obvodu umístěno 24 tlakových odběrů. Výstupní otvor generátoru syntetizovaného paprsku je umístěn mezi 13 a 14 tlakový odběr. Poloha výstupního otvoru generátoru syntetizovaného paprsku byla v úhlu 90° vůči vektoru rychlosti nabíhajícího proudu. Konstrukce generátoru syntetizovaného paprsku je zobrazena na obrázku 2. Generátor se skládá ze sedmi dutin, kde každá dutina obsahuje dva budiče - reproduktory a má obdélníkovým výstupním otvor o délce 27mm . Změnou tloušťky a geometrie vložky lze měnit šířku výstupního otvoru h a současně objem dutiny, čímž lze dosáhnout změny amplitudově frekvenční charakteristiky generátoru syntetizovaného paprsku. V poloze $\pm 55^\circ$ byly umístěny dvě $0,8\text{ mm}$ vysoké turbulizační zigzag pásy. Experiment byl proveden pro Reynoldsovo číslo $Re = 7 \times 10^4$ při intenzitě turbulence volného proudu $Tu = 1\%$.



Obr. 1 Model - válec s koncovými deskami



Obr. 2 Montážní schéma generátoru syntetizovaného paprsku



Obr. 3 Průběh rychlosti u_o , měřeno HW $0,5\text{ mm}$ nad výstupním otvorem generátoru synt. paprsku, ($f_c = 400\text{ Hz}$, $f_{AM} = 50\text{ Hz}$, $P_{in} = 1,12\text{ W}$, $h = 0,5\text{ mm}$)

Pro buzení generátoru syntetizovaného paprsku byl jako nosný použit sinový signál o frekvenci $f_C = 400\text{Hz}$ a 1258Hz . Nosná frekvence byla modulována obdélníkovým signálem 50/50 o modulační frekvenci $f_{AM} = 50, 100, 200$ a 400 Hz . Průběh rychlosti měřené ve vzdálenosti $0,5\text{ mm}$ nad výstupním otvorem generátoru syntetizovaného paprsku je zobrazen na obr. 3. Byly použity dvě různé šířky výstupního otvoru $h = 0,28$ a $0,5\text{ mm}$. Z hodnot získaných z tlakových měření byly v závislosti na frekvenci (nosné i modulační) a na intenzitě syntetizovaného paprsku spočteny součinitel vztlaku c_y a součinitel odporu c_x .

$f_C(\text{Hz}) \backslash h(\text{mm})$	0,5	0,28
400	6,67	2,1
1258	-	6,7

Tab. 1 Hodnota Stokesova čísla výstupního otvoru St_0 v závislosti na šířce výstupního otvoru h a nosné frekvenci f_C .

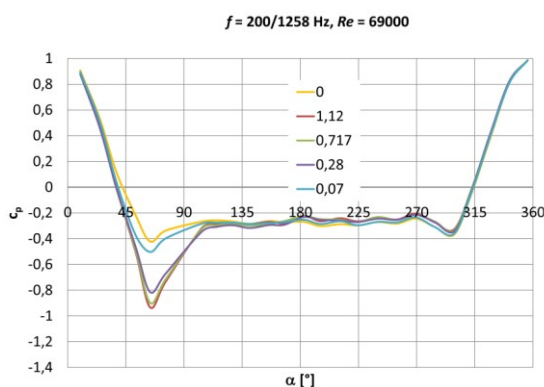
$f_{AM}(\text{Hz})$	50	100	200	400	1258
F^+	1,26	2,52	5,03	10,06	31,65

Tab. 2 Hodnota Strouhalova čísla v závislosti na modulační frekvenci f_{AM}

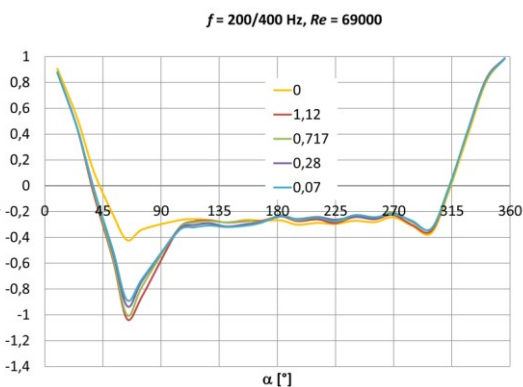
Diskuze výsledků

Na obrázcích 4 až 9 je zobrazeno rozložení tlakového součinitele po povrchu válce s ohledem na budící frekvence f_C a f_{AM} , šířku výstupního otvoru h a dodaný výkon P_{in} . Ve všech šesti případech jsou data vztažena k velikosti dodané energie P_{in} , což ovšem nezohledňuje, zda je generátor provozován v rezonanční oblasti. Jiným pohledem by bylo vztáhnout průběhy c_p , c_x a c_y k součiniteli hybnosti c_μ . Z průběhu je patrné, že rozhodující vliv na hodnoty c_x a c_y má modulační frekvence.

Protože při nosné frekvenci $f_C = 400\text{ Hz}$ je intenzita syntetizovaného paprsku nižší než při 1290 Hz , lze říci, že při návrhu generátoru syntetizovaného paprsku je vhodnější respektovat nižší hodnoty Stokesova čísla výstupního otvoru St_0 , hodnoty viz Tab. 1, tak jak je zmíněno v [6]. Positivní vliv syntetizovaného paprsku na velikost součinitele vztlaku c_y a odporu c_x je patrný na obr. 10 a 11. Při buzení $f_C = 200\text{ Hz}$ a $f_{AM} = 400\text{ Hz}$ (Obr. 10) bylo zřejmě dosaženo maxima průhybu membrány budiče již při nízkých hodnotách P_{in} . Lze vyslovit předpoklad, že bude vhodnější použít modulační frekvenci s nižšími hodnotami poměru tak, aby v jednom „kladném“ pulsu obdélníkového signálu proběhla nejméně jedna celá perioda nosné frekvence. Pak i při velmi nízkých hodnotách dodané energie P_{in} může zřejmě dojít k maximální výchylce membrány budiče, a tím k vysokým okamžitým hodnotám součinitele hybnosti c_μ , díky čemuž lze dosáhnout výrazně vyšší efektivity řízení mezní vrstvy.

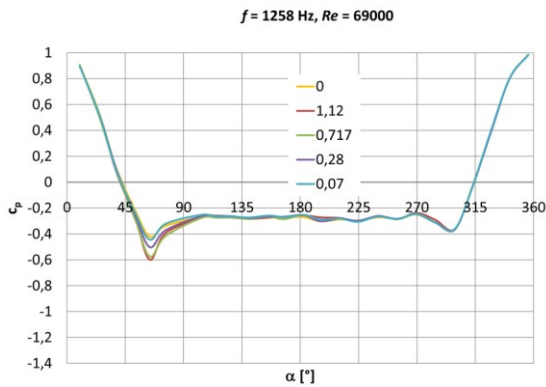


Obr. 4 Rozložení tlakového součinitele c_p , šířka



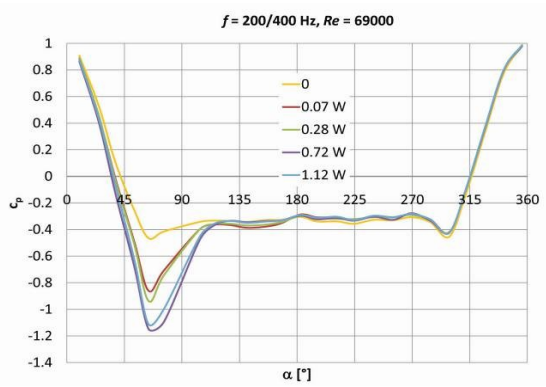
Obr. 5 Rozložení tlakového součinitele c_p , šířka

výstupního otvoru $h = 0,28$ mm

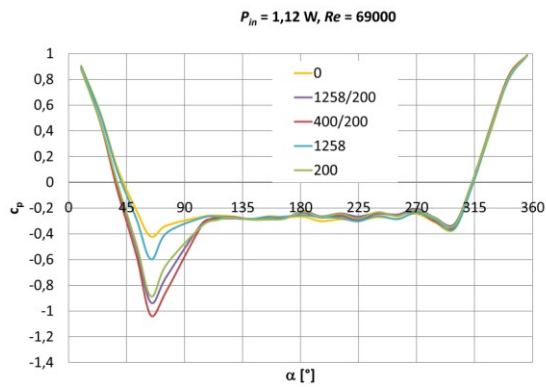


Obr. 6 Rozložení tlakového součinitele c_p , šířka výstupního otvoru $h = 0,28$ mm

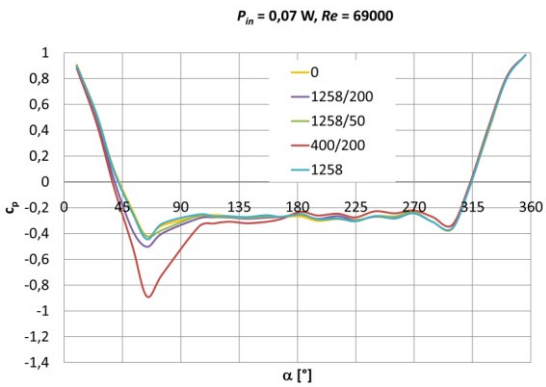
výstupního otvoru $h = 0,28$ mm



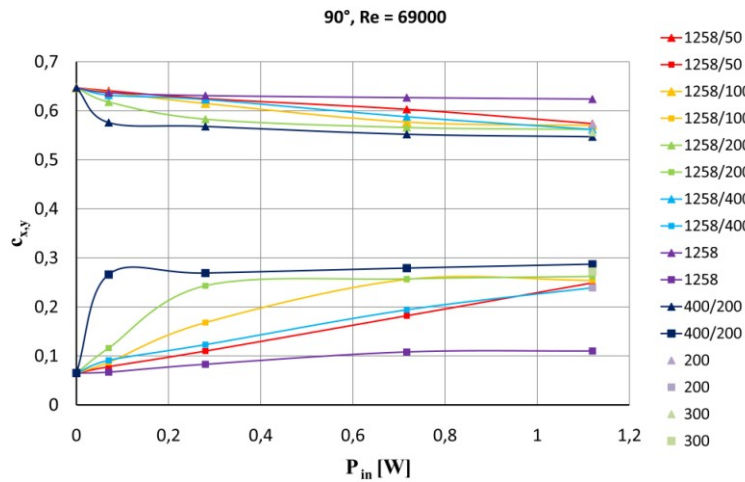
Obr. 7 Rozložení tlakového součinitele c_p , šířka výstupního otvoru $h = 0,5$ mm



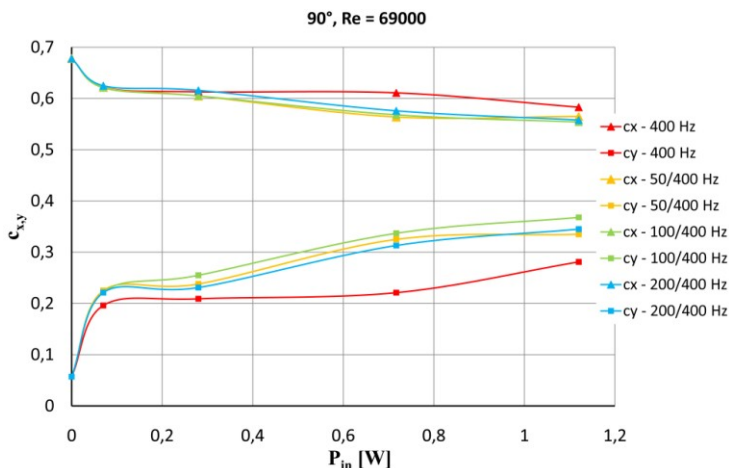
Obr. 8 Rozložení tlakového součinitele c_p , šířka výstupního otvoru $h = 0,28$ mm



Obr. 9 Rozložení tlakového součinitele c_p , šířka výstupního otvoru $h = 0,28$ mm



Obr. 10 Hodnoty součinitele vztlaku c_y a odporu c_x v závislosti na dodané energii P_{in} , šířka výstupního otvoru $h = 0,28$ mm



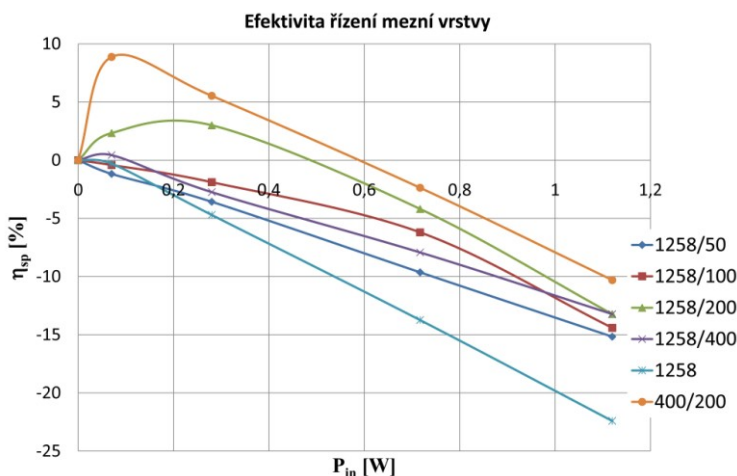
Obr. 11 Hodnoty součinitele vztlaku c_y a odporu c_x v závislosti na dodané energii P_{in} , šířka výstupního otvoru $h = 0,5$ mm

Závěr

V případě, že chceme minimalizovat velikost ztrát použitím metod aktivního řízení, je třeba vzít v úvahu nutnost zahrnout spotřebovanou energii na toto řízení do celkové energetické bilance. Na obr. 12 je zobrazen získaný průběh efektivity řízení η_{sp} mezní vrstvy pomocí syntetizovaného paprsku, (6), [7].

$$\eta_{sp} = \frac{W_{usp}}{W_{dod}} \quad (6)$$

Pouze pro nejnižší hodnoty buzení ($P_{in} = 0,07$ a $0,28$ W) a pro frekvence odpovídající optimu Strouhalova čísla F^+ bylo dosaženo pozitivního výsledku, tj. došlo ke snížení součinitele odporu c_x bez nárůstu spotřebované energie. Pokud by nás zajímal i efekt syntetizovaného paprsku na hodnotu součinitele vztlaku c_y , je třeba použít definici efektivity zohledňující jeho změnu, např. [2]. Největší úspory cca 9% bylo dosaženo pro nosnou frekvenci $f_C = 400$ Hz a modulační frekvenci $f_{AM} = 200$ Hz. Pro srovnání, k úspoře 9% celkového výkonu bylo třeba 1,6% energie celkového výkonu (tj. cca 5,5 krát méně!).



Obr. 12 Efektivita řízení mezní vrstvy v závislosti na příkonu generátoru syntetizovaného paprsku

Na závěr lze konstatovat, že použití nosné frekvence odpovídající rezonanční frekvenci generátoru syntetizovaného paprsku, která je modulovaná frekvencí odpovídající optimální hodnotě Strouhalova čísla F^+ je pro excitaci syntetizovaného paprsku vhodné. S ohledem na mnohem širší pracovní rozsah takového generátoru syntetizovaného paprsku je dokonce vhodnější než použití nemodulovaného signálu.

Poděkování

Tato práce vznikla za podpory grantového projektu GA ČR 101/08/1112 a Výzkumného centra MŠMT 1M06059.

Literatura

- [1] Glezer, A. and Amitay, M. 2002 Synthetic jets. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 34, 503–529
 - [2] Greenblatt D., Wygnanski I. J.: The Control of Flow Separation by Periodic Excitation. *Aerospace Science* 36 (2000), pp. 487-54
 - [3] Uruba V.: On a synthetic jet flow, *GAMM Annual Meeting 2005* – Luxembourg, 20 Dec 2005
 - [4] Milan Matějka, Natalie Souckova, Lukáš Popelka, Jiří Nožička: Active flow control on the simplified flapped airfoil, 1st CEAS European Air and Space Conference, 10-13 September 2007 Berlin, Germany, ISSN 0700-4083
 - [5] Gallas, Q, Mathew, J. Kaysap, A., Holman, R., Nishida, T., Carroll, B., Sheplak, M., Cattafesta, L.: Lumped Element Modeling of Piezoelectric-Driven Synthetic Jet Actuators. AIAA 2002-0125, 2002.
 - [6] Nae, C.: Unsteady Flow Control Using Synthetic Jet Actuator, AIAA 2000-2403
 - [7] Matejka, M., Popelka, L., Safarik, P., Nozicka, J. (2008): Influence of Active Methods of Flow Control on the Compressor Blade Cascade Flow, ASME Turbo Expo 2008, Berlin, GT2008-51109
- Wygnanski I., Boundary layer and flow control by periodic addition of momentum, 49th AIAA Shear Flow Conference, Snowmass, USA, June 29–July 4, AIAA Paper 972117, 1997
- Seifert A., Bachart T., Koss D., Shepshelovitch M., Wygnanski I., Oscillatory blowing: a tool to delay boundary-layer separation, AIAA J. 31 (11) (1993) 2052–2060.
- Greenblatt D., Darabi A., Nishri B., Wygnanski I., Separation control by periodic addition of momentum with particular emphasis on dynamic stall, Heli Japan 98, American Helicopter Society, Gifu, Japan, April 1998, paper T3–4.
- Amitay M., Honohan A., Trautman M., Glezer A., Modification of the aerodynamic characteristics of bluff bodies using fluidic actuators, 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, Snowmass Village, CO, USA, June 1997.
- Béra J.-Ch., Michard M., Sunyach M., Comte-Bellot G., Changing lift and drag by jet oscillation: experiments on a circular cylinder with turbulent separation. *Eur. J. Mech. B - Fluids* 19 (2000) 575–595, S0997-7546(00)00122-9/FLA
- Wayne P. Liu, George H. Brodie, A demonstration of MEMS-based active turbulence transition. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21 (2000) 297-303
- P. Catalano, M. Wang, G. Iaccarino, Ivo F. Sbalzarini, P. Koumoutsakos, Optimization of cylinder flow control via zero net mass flux actuators. Center for Turbulence Research Proceedings of the Summer Program 2002