

# Spektrální analýza kontinuálního a syntetizovaného proudu

Ing. Zuzana Broučková

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Trávníček, CSc., prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.

## **Abstrakt**

*Tato experimentální práce se zabývá charakterizací tří druhů proudů vzduchu (kontinuálního, syntetizovaného a kontinuálního řízeného syntetizovaným proudem) pomocí spektrální výkonové hustoty (PSD). Tyto charakteristiky byly vyhodnocovány z bodových měření rychlosti, prováděných pomocí anemometru se žhaveným drátkem (CTA). Z naměřeného signálu, popř. z časového průběhu rychlosti, byla spektrální výkonová hustota vyhodnocována pomocí programu MATLAB. Výsledné grafy ukázaly vliv řízení na hlavní proud. U samotného syntetizovaného proudu byla navíc nalezena výrazná kvalitativní změna v okolí hranice jeho existence. Dále bylo prokázáno, že takto zásadní změna proudového pole může být velmi dobře kvantifikována.*

## **Klíčová slova**

*Spektrální výkonová hustota, syntetizovaný proud, aktivní řízení*

## **1. Úvod**

Aktivní řízení tekutinového proudu je proces, při kterém je hlavní proud cíleně ovlivňován účinkem nějakého aktivního buzení. Tímto buzením může být i jiný, tzv. řídicí proud. Účelem řízení je měnit vlastnosti hlavního proudu, tzn. např. řídit jeho směr, zvýšit směšování, omezit hlučnost atp. Aby bylo možné stanovit vhodné parametry řízení, je výhodné znát dominantní frekvence, které se v proudu vyskytují. Přímoou metodou, jak tyto frekvence zjistit, je užití spektrální analýzy. Pomocí spektrální analýzy je rovněž možné posoudit vliv řízení na hlavní proud.

Pro mnohé aplikace lze s úspěchem využít jako řídicí proud *proud syntetizovaný*. Syntetizovaný proud (angl. *synthetic jet*) je proud, který vzniká periodickým pohybem membrány nebo pístu v dutině, která je s okolím propojena vhodným otvorem [1]. Tento pohyb vyvolá střídavé nasávání a vytlačování tekutiny otvorem. Ve výstupním otvoru je časově střední rychlost nulová, ale dále za výstupem postupující víry vytvářejí proud s nenulovou složkou rychlosti. Je známo, že pro správnou funkci syntetizovaného proudu musí jeho parametry ležet v oblasti existence syntetizovaných proudů (viz. např. [2, 3]). V nedávné době bylo ukázáno, že na základě spektrální analýzy lze relativně snadno nalézt kritérium existence syntetizovaného proudu, tedy také oblast parametrů, při kterých bude zajištěna správná funkce generátoru syntetizovaného proudu (viz [4]).

Tato práce se zabývá ukázkami využití spektrální analýzy při experimentech s osově symetrickým kontinuálním proudem, osově symetrickým syntetizovaným proudem a s osově symetrickým kontinuálním proudem, který je aktivně řízen anulárním syntetizovaným proudem.

## 2. Přehled poznatků, podobnostní kritéria

### 2.1 Osově symetrický kontinuální proud

Zatopený osově symetrický proud (angl. *submerged jet*) je proud, který vytéká z kruhové trubice do prostředí o stejných vlastnostech, jako má proud sám. Rozměrově je osově symetrický proud charakterizován jedním délkovým měřítkem, a sice svým výstupním průměrem  $D$ .

Při popisu osově symetrického proudu je Reynoldsovo číslo určeno na základě výstupního průměru trubice  $D$  (konkrétně zde viz odstavec 3) a střední rychlosti v ústí  $U_m$

$$Re = \frac{U_m D}{\nu}, \quad (1)$$

kde  $\nu$  je kinematická viskozita.

Chování turbulentních proudů je značně ovlivněno přítomností koherentních struktur, tedy uspořádaných vírových struktur velkých měřítek. Odplouvání koherentních struktur se děje s určitou frekvencí  $f_0$ . Frekvenci odplouvání je obvyklé vyjadřovat v bezrozměrném tvaru, tedy ve formě Strouhalova čísla:

$$St_0 = \frac{f_0 D}{U_m}, \quad (2)$$

kde  $U_m$  je střední rychlost v ústí trubice.

Přítomnost koherentních struktur v proudu je možno zjistit přímou či nepřímou metodou [5].

Přímá metoda znamená detekci periodických struktur vizuálně či pomocí spektrální analýzy pulzací rychlostí či tlaku. Nepřímá metoda spočívá v působení periodického buzení na hlavní proud a vyhodnocování vlivu tohoto buzení na proud. Je-li v buzeném proudu přítomna uspořádaná periodická struktura, účinek buzení o podobné frekvenci její vliv zesílí vlivem „vnímavosti“ hlavního proudu (angl. *receptivity*, viz např. Parekh a kol. [6]).

Hodnota  $St_0$  se podle různých autorů liší. Např. Crow a Champagne [7] uvádějí, že přirozené frekvenci proudu  $f_0$  v oblasti konce potenciálního jádra proudu odpovídá Strouhalovo číslo  $St_0 = 0,3$ . Tuto frekvenci nazývají preferovaný mód (angl. *preferred mode*).

### 2.2 Syntetizovaný proud

Pro popis syntetizovaného proudu jsou zapotřebí dvě délková měřítka: průměr výstupního otvoru generátoru syntetizovaného proudu  $D_{SJ}$  a „délka zdvihu“ (angl. *stroke length* [1])  $L_0$ .

Délka zdvihu  $L_0$  označuje délku sloupce tekutiny, který je vytlačen z dutiny během vyfukovací periody:

$$L_0 = U_0 T, \quad (3)$$

kde  $T = 1/f$  je doba jedné periody,  $f$  je frekvence proudu a  $U_0$  je časově střední rychlost na ose syntetizovaného proudu během celé periody generovaná vyfukovací částí jeho periody  $T_E$  [1]:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T_E} u_0(t) dt, \quad (4)$$

kde  $u_0(t)$  je časový průběh okamžité rychlosti během periody (v případě ideálního sinového průběhu rychlosti platí  $T_E = T/2$ ).

Reynoldsovo číslo pro syntetizovaný proud je často používáno ve tvaru (viz např. [2, 3, 4]):

$$Re_H = \frac{\bar{U}D_{SJ}}{\nu}, \quad (5)$$

kde  $\bar{U}$  je časově střední rychlost na ose syntetizovaného proudu během vytlačovací fáze generovaná vyfukovací částí jeho periody  $T_E$ . V ideálním případě, kdy  $T_E = T/2$ , platí  $\bar{U} = 2U_0$ .

Bezrozměrné vyjádření frekvence pro syntetizovaný proud je (viz např. [2, 3, 4]):

$$St_H = \frac{\omega D_{SJ}}{\bar{U}} = \frac{\pi f D_{SJ}}{U_0} = \frac{\pi D_{SJ}}{L_0}. \quad (6)$$

Pro popis syntetizovaných proudů je často výhodné použít i číslo Stokesovo (viz např. [2, 3, 4]).

$$S_H = \sqrt{St_H Re_H} = D_{SJ} \sqrt{\frac{2\pi f}{\nu}}. \quad (7)$$

Stokesovo číslo se uplatňuje zejména při popisu kritérií existence syntetizovaného proudu (angl. *formation criterion*). Přehled dostupných poznatků o kritériích existence syntetizovaných proudů a o různých parametrech užívaných při popisu syntetizovaných proudů byl uveden např. v [3, 4]. Kritérium existence syntetizovaného proudu udává parametry, za kterých syntetizovaný proud existuje. Jedním z nejčastěji užívaných je předpis pro osově symetrický syntetizovaný proud, který uvádí Holman a kol. [2]:

$$Re_H = 0,16S_H. \quad (8)$$

Vztah (8) lze také přepsat do tvaru:

$$\frac{L_0}{D_{SJ}} = 0,5, \quad (9)$$

tzn. minimální hodnota poměru  $L_0/D_{SJ}$  pro existenci proudu je 0,5.

### 2.3 Parametry řízení

Strouhalovo číslo pro řízení osově symetrického stacionárního proudu proudem periodickým o frekvenci  $f$  je:

$$St = \frac{fD}{U_m}. \quad (10)$$

Při řízení proudů je účelné zavést poměry některých veličin. Jedná se o poměry rychlostí, objemových toků a průtočných hybností (ve všech následujících případech se jedná o poměry veličin v ústí generátoru syntetizovaného proudu a v ústí trubice).

*poměr rychlostí*

$$c_u = \frac{U_0}{U_m} \quad (11)$$

*poměr objemových toků*

$$c_q = \frac{U_0}{U_m} \frac{A_{SJ}}{A}, \quad (12)$$

kde  $A_{SJ}$  je výstupní průřez trysek všech řídicích syntetizovaných proudů (např. pro jednu kruhovou tryšku  $A_{SJ} = \pi D_{SJ}^2/4$ ) a  $A$  je výstupní průřez trysky hlavního proudu (např. pro kruhovou tryšku  $A = \pi D^2/4$ )

*poměr průtočných hybností*

V případě, že kontinuální proud je laminární, lze jeho profil na výstupu z trubice aproximovat profilem parabolickým (viz [8]) a poměr průtočných hybností obdržíme ve tvaru:

$$c_m = \pi^2 \frac{3}{16} \left( \frac{U_0}{U_m} \right)^2 \frac{A_{SJ}}{A}. \quad (13)$$

Je-li proud turbulentní, lze jeho profil aproximovat profilem sedminovým (viz [8]) a poměr průtočných hybností je:

$$c_m = \frac{\pi^2}{1,22^2} \frac{144}{392} \left( \frac{U_0}{U_m} \right)^2 \frac{A_{SJ}}{A}. \quad (14)$$

Podrobnosti o integraci průtočné hybnosti syntetizovaného proudu viz [9].

### 3. Experimentální zařízení

Schéma použitého experimentálního zařízení je na Obr. 1. Jedná se o stejné zařízení, jaké bylo použito v práci [9]. Zařízení je tvořeno trubicí (pozice 1), ze které vytéká osově symetrický proud (proud hlavní), a generátorem anulárního syntetizovaného proudu (proudu řídicího), pozice 3, 4 a 5. Zařízení je umístěno vertikálně, hlavní i řídicí proud vytékají směrem nahoru.

Trubice, ze které vytéká osově symetrický proud vzduchu, má délku  $L = 750$  mm a vnitřní průměr  $D = 10,05$  mm. Proud vzduchu je do trubice přiváděn z tlakového rozvodu budovy přes dva redukční ventily, regulační ventil a rotametr (Aalborg P41A6-BD1) přívodní hadicí o světlosti 12,5 mm.

Generátor anulárního syntetizovaného proudu je tvořen reproduktorem Monacor SP-7/4S (4  $\Omega$ , max. 8 W, rms 4 W) s membránou o průměru  $D_D = 53$  mm (Obr. 1, poz. 3) a válcovou dutinou o průměru  $D_{cav} = 60$  mm a výšce  $l_{cav} = 30$  mm, ze které proud vystupuje nahoru 12 kruhovými otvory do anulární trysky (Obr. 1, poz. 5). Tryska je umístěna soustředně kolem



Druhou možností popsaného generátoru anulárního syntetizovaného proudu (Obr. 1) je generovat osově symetrický syntetizovaný proud. Osově symetrický proud vystupuje kruhovým otvorem o průměru  $d = 9$  mm a délce  $l = 15,3$  mm, který je umístěn naproti reproduktoru, v jeho ose (poz. 6). Při generování anulárního syntetizovaného proudu je tento otvor zaslepen kovovou lepicí páskou a naopak, při generování osově symetrického proudu je zalepen výstupní otvor anulární trysky. Průměr výstupního otvoru  $d$  byl záměrně zvolen tak, aby jeho plocha odpovídala ploše výstupního otvoru anulárního syntetizovaného proudu. Jak bylo ukázáno v [9], vzhledem k tomu, že generátor osově symetrického syntetizovaného proudu používá stejný reproduktor a stejný objem dutiny jako generátor anulárního syntetizovaného proudu, plochy jejich výstupních otvorů jsou téměř shodné, a také jejich frekvenční charakteristiky jsou obdobné. Proto znalost chování osově symetrického syntetizovaného proudu je vhodnou přípravou před experimenty se složitějším případem anulárního syntetizovaného proudu.

Další podrobnosti o použitém zařízení i detailnější popis osově symetrického a anulárního syntetizovaného proudu lze nalézt v [9].

#### 4. Přístroje a metody

K měření rychlosti byl použit anemometr MiniCTA 54T30 DANTEC s jednodrátkovou sondou 55P16 s drátkem o průměru  $5 \mu\text{m}$  a délce  $1,25$  mm. Výstup z anemometru je veden na svorkovnici CB-68LP a měřicí kartu NI PCI-6023E. Zpracování signálu je provedeno na PC pomocí softwaru dodávaného společně s anemometrem. V případě měření rychlostí syntetizovaného proudu bylo na druhý kanál svorkovnice rovněž přiváděno napájení reproduktoru. Tento pomocný signál byl později využit při zpracování dat.

Anemometr byl kalibrován v rozsahu  $(0,21 - 37,01) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Byl použit kalibrační polynom 4. stupně. Maximální chyba linearizace kalibračního polynomu byla  $8,6\%$ .

Při vlastním měření byla použita vzorkovací frekvence v rozsahu  $(7\div 10)$  kHz a počet vzorků byl  $8192\div 16384$ .

Další zpracování naměřených dat bylo provedeno v programu MATLAB [10].

Z naměřeného signálu je také možno vyhodnotit spektrální výkonovou hustotu (angl. *Power Spectral Density*, PSD). K tomu byla použita knihovní funkce MATLABu „periodogram“.

Fourierův obraz funkce času  $x(t)$  (též frekvenční spektrum funkce) je (viz [11]):

$$X_T(f) = \int_{-T/2}^{T/2} x(t)e^{-i2\pi ft} dt, \quad (15)$$

kde  $T$  je délka časového okénka.

Periodogram je frekvenční závislost utvořená z frekvenčního spektra následovně:

$$\frac{1}{T} X_T^c(f) X_T(f), \quad (16)$$

kde  $X_T^c(f)$  je číslo komplexně sdružené k  $X_T(f)$ .

Je-li náhodný proces ergodický, pak lze spektrální výkonovou hustotu  $S_{xx}(f)$  vypočítat přímo pomocí periodogramu, tedy:

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{T} X_T^c(f) X_T(f) \quad (17)$$

(další podrobnosti o použité funkci viz [11] a manuál softwaru MATLAB [10]).

V grafech této práce jsou vždy uváděny jednotky spektrální výkonové hustoty PSD určené pro konkrétní případ vyhodnocení. Za zmínku ovšem stojí skutečnost, že to nebývá v literatuře obvyklé. V dostupné literatuře se velmi často u svislé osy takových grafů uvádí "libovolná jednotka" (v angličtině "arbitrary unit"), [12].

## 5. Výsledky provedených experimentů

Nejprve byl proměřován samotný osově symetrický syntetizovaný proud. Byly zkoumány čtyři případy. Vždy se jednalo o proud s frekvencí 230 Hz. Jednotlivé experimenty se lišily použitým příkonem reproduktoru. Přehled experimentů s osově symetrickým syntetizovaným proudem ukazuje Tabulka 1.

*Tabulka 1. – Přehled experimentů s osově symetrickým syntetizovaným proudem*

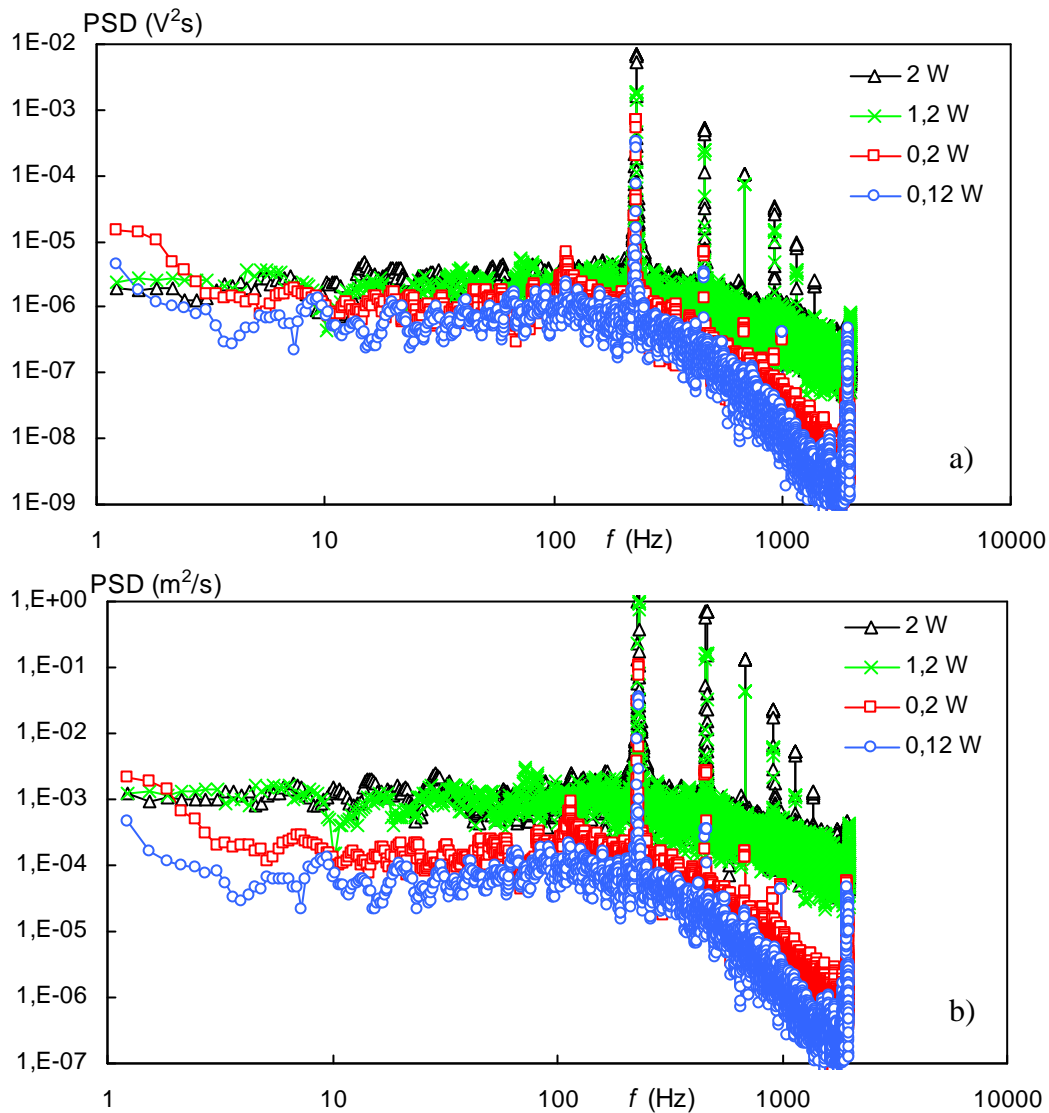
	$f$ [Hz]	$P$ [W]	$U_0$ [m/s]	$L_0/D_{SJ}$	$Re_H$	$St_H$	$S_H$
1	230	0,12	1,08	0,52	1222	6,0	85,8
2	230	0,20	1,44	0,70	1632	4,5	85,8
3	230	1,20	3,45	1,67	3911	1,9	85,8
4	230	2,00	4,47	2,16	5058	1,5	85,8

Případy 1, 2 a 4 byly již dříve zkoumány a popsány v pracích [3] a [9]. Zde byl popsán vliv parametrů syntetizovaného proudu na jeho dosah. Bylo ukázáno, že s přiblížením pracovního bodu (tj. parametrů syntetizovaného proudu) směrem k hranici existence klesá dosah proudu. Hranice existence byla stanovena pro tento konkrétní případ přibližně na hodnotě  $L_0/D_{SJ} = 0,6$ ; tento bod svými parametry odpovídá bodu 2 z Tabulky 1, ačkoli nyní změřená hodnota rychlosti  $U_0$  pro stejný případ je poněkud vyšší (přibližně o 15%) – především vlivem odchylek stavových veličin pro různé série měření. V této práci byly uvedené případy zkoumány znovu z hlediska spektrální výkonové hustoty.

Obrázek 2 ukazuje graf spektrální výkonové hustoty proudů z Tabulky 1. V části a) byla spektrální výkonová hustota vyhodnocena přímo ze signálu z anemometru, tj. z napětí ve voltech. V části b) téhož obrázku byla spektrální výkonová hustota získána z rychlosti, tj. ze signálu, který byl přepočten pomocí kalibračního polynomu. V obou případech se tedy jedná o stejná měření, která byla provedena na ose proudu ve vzdálenosti  $x/D_{SJ} = 3$ . Z grafů na Obr. 2 je vidět, že mezi proudy s příkonem 0,20 W a 1,20 W dochází ke skokovému poklesu hladiny spekter a navíc dochází také k proměně tvaru spektra. Zatímco spektra pro případy 3 a 4 (Tab. 1) mají výrazná lokální maxima v místech budící frekvence a jejich vyšších harmonických složek, ve spektrech 1 a 2 je lokální maximum spolehlivě pozorovatelné pouze v místě budící frekvence, ostatní jsou méně výrazná, tato spektra mají také prudší pokles hodnot v oblasti vyšších frekvencí než spektra pro případy 3 a 4. Ukázaná kvalitativní i kvantitativní změna spekter indikuje, že mezi případy 2 a 3 leží hranice existence syntetizovaného proudu. Získaný výsledek dobře souhlasí s dřívějším pozorováním v pracích [3, 9]. Výsledky ukazují, že proud s příkonem  $P = 2,0$  W leží spolehlivě v oblasti existence syntetizovaných proudů a lze ho použít při následných experimentech. Oproti tomu proudy s příkony  $P = 0,20$  a  $0,12$  leží již mimo oblast existence, ačkoli jejich poměry  $L_0/D_{SJ}$  jsou vyšší (viz Tabulka 1) než obvykle užívaný kritický poměr 0,5 dle Holmana a kol. [2] – viz rovnice (9).

Je zajímavé podotknout, že ve vzdálenosti  $x/D_{SJ} = 3$  je v proudu patrný vliv koherentních struktur, jak je zřejmé z jednotlivých izolovaných špiček spektrální výkonové hustoty na Obr. 2a) a b). Proud tedy ještě není zcela turbulentní. Obdobné chování syntetizovaného proudu bylo zkoumáno např. v práci Tesaře a Kordíka [13].

Změny v grafech spektrální výkonové hustoty jsou na Obr. 2 dobře viditelné jak ve spektrech vytvořených z rychlosti, tak i ve spektrech vytvořených přímo ze signálu z anemometru. Je tedy zřejmé, že ačkoli přepočítání mezi napětím a rychlostí je nelineární, pro stanovení hranice existence postačuje použít signál ve voltech. Tato jednoduchá metoda detekce hranice existence syntetizovaného proudu je stejná, jako byla nedávno prezentována v práci [4].



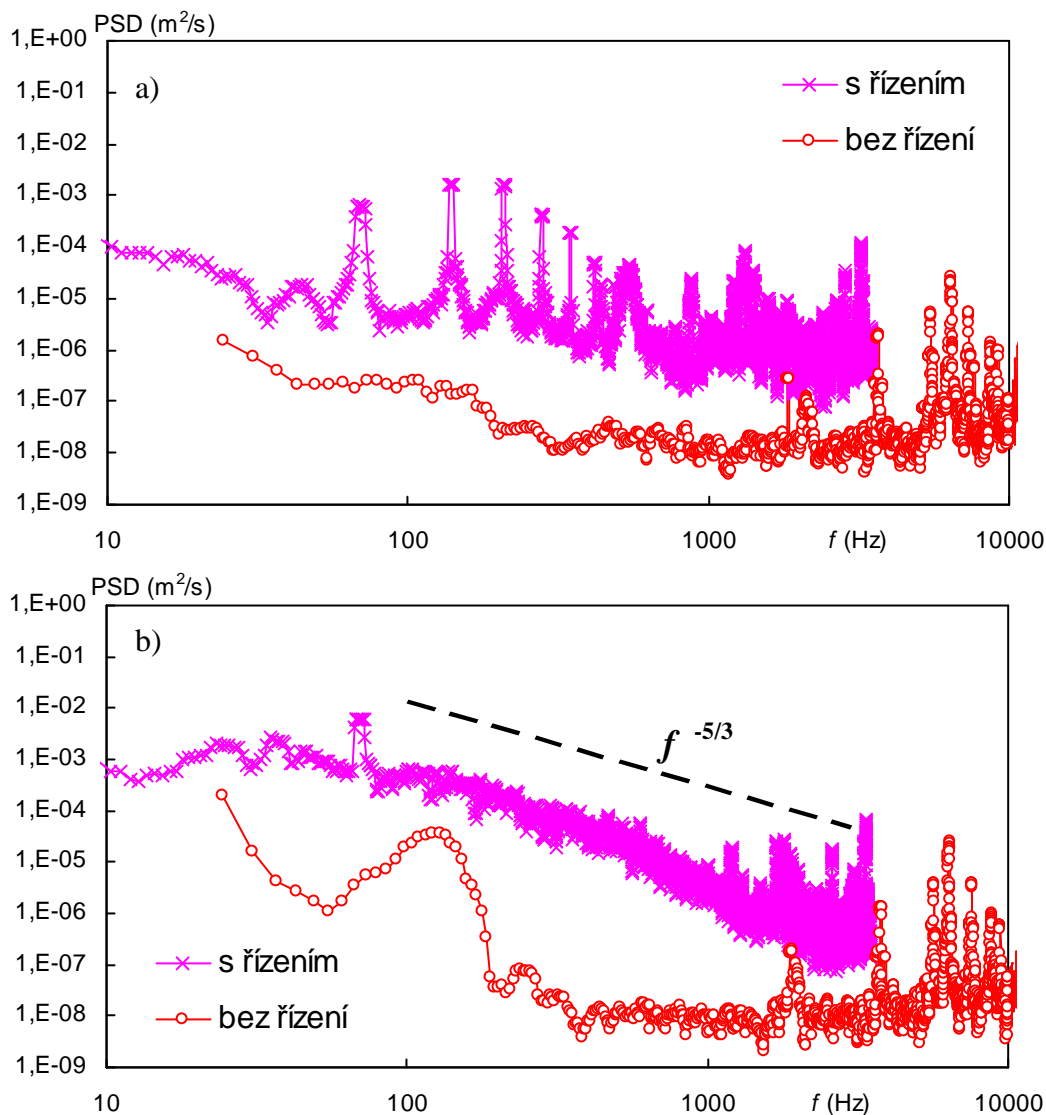
**Obr. 2.** Graf spektrální výkonové hustoty osově symetrického syntetizovaného proudu,  $f = 230$  Hz,  $x/D_{SJ} = 3$  (na ose proudu)  
 a) PSD ze signálu napětí,  
 b) PSD ze signálu rychlosti.

Experimenty s osově symetrickým kontinuálním proudem byly provedeny pro dva různé průtoky hlavního proudu. Jim odpovídají Reynoldsova čísla  $Re = 1600$  a  $Re = 5500$ . Pro řízení byl použit anulární syntetizovaný proud s konstantním příkonem  $P = 2,0$  W. Tento příkon byl zvolen na základě experimentů s osově symetrickým syntetizovaným proudem, které byly popsány výše. Následující Tabulka 2 ukazuje přehled parametrů zde prezentovaných experimentů s osově symetrickým kontinuálním proudem.



**Tabulka 2.** – Přehled experimentů s osově symetrickým kontinuálním proudem

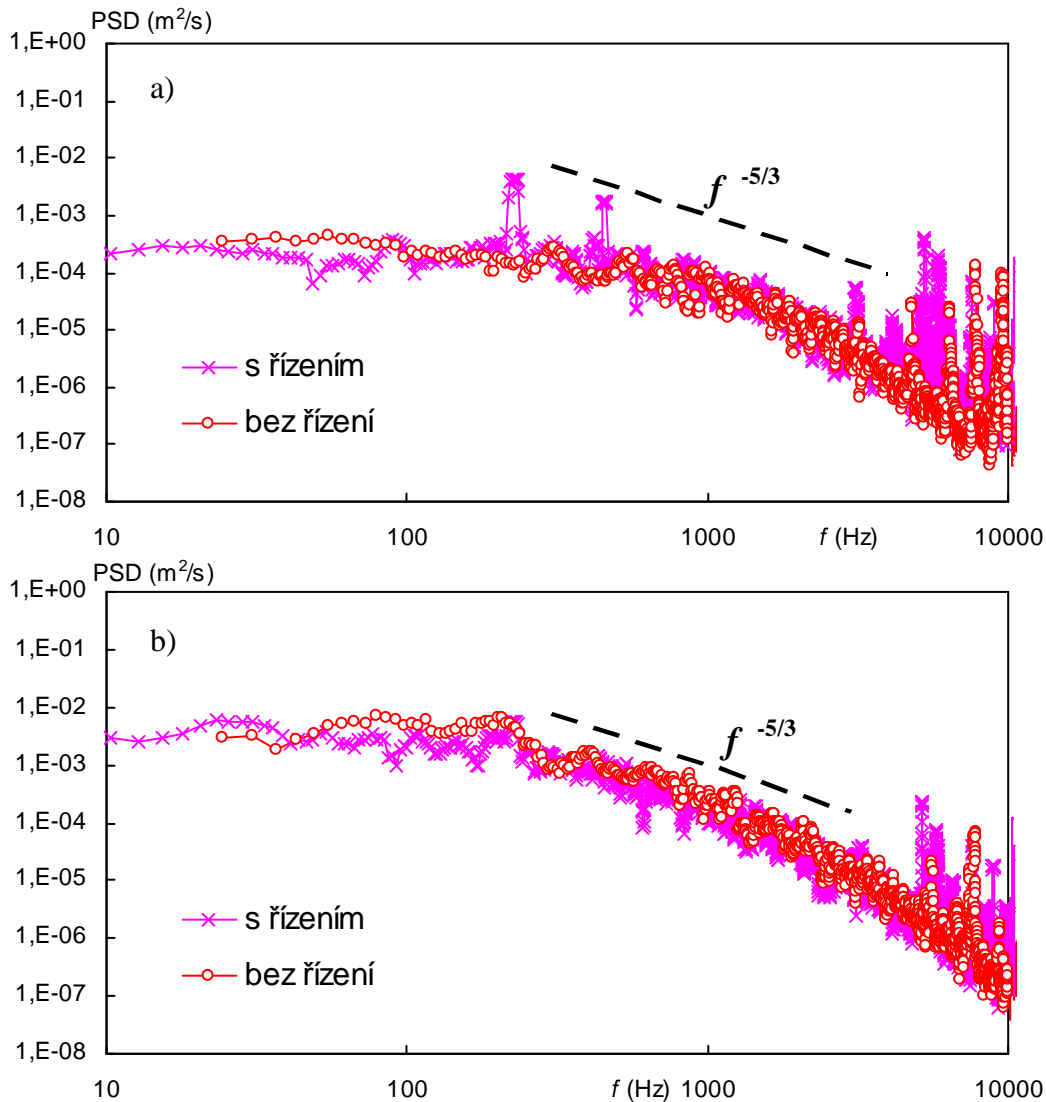
	$U_m$ [m/s]	$Re$	$f$ [Hz]	$P$ [W]	$U_0$ [m/s]	$Re_H$	$St$	$c_u$	$c_q$	$c_m$
1	2,5	1600	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2,5	1600	70	2,00	3,66	1450	0,28	1,5	1,2	3,3
3	8,5	5500	0	0	0	0	0	0	0	0
4	8,5	5500	230	2,00	3,92	1534	0,27	0,5	0,4	0,4



**Obr. 3.** Graf spektrální výkonové hustoty osově symetrického kontinuálního proudu,  $Re = 1600$ , bez řízení a s řízením,  $f = 70$  Hz  
 a)  $y/D = 0$  (na ose proudu),  
 b)  $y/D = 6,2$  (na ose proudu).

Obrázek 3a) ukazuje graf spektrální výkonové hustoty na ose proudu s  $Re = 1600$  ve vzdálenosti  $y/D = 0$  (ústí trubice) bez řízení a s řízením. Řídící proud měl frekvenci  $f = 70$  Hz (tomu odpovídá  $St = 0,28$ , dle rovnice (10)). Dle spektra proudu neřízeného je vidět, že proud s tímto Reynoldsovým číslem je na výstupu z trubice laminární (to bylo potvrzeno i vizualizací a charakterem rychlostního profilu, viz [9, 14]). Ve spektru se nevyskytuje dominantní frekvence. Oproti tomu, je-li zapnut řídicí proud, dochází k nárůstu hodnot

v celém spektru. A objevuje se zde hlavní frekvence, tj. frekvence řídicího proudu,  $f = 70$  Hz, a její vyšší harmonické složky.



**Obr. 4.** Graf spektrální výkonové hustoty osově symetrického kontinuálního proudu,  $Re = 5500$ , bez řízení a s řízením,  $f = 230$  Hz  
 a)  $y/D = 0$  (na ose proudu),  
 b)  $y/D = 6,2$  (na ose proudu).

Obrázek 3b) ukazuje graf spektrální výkonové hustoty na ose proudu s  $Re = 1600$  poněkud dále po proudu – ve vzdálenosti  $y/D = 6,2$ , opět bez řízení a s řízením. Parametry řídicího proudu jsou stejné, jako u proudu z Obr. 3a). U proudu neřízeného lze identifikovat hlavní frekvenci ve spektru, tedy přirozenou frekvenci proudu  $f_0$ , která zde činí zhruba 100 Hz. Této frekvenci odpovídá Strouhalovo číslo  $St_0 = 0,4$ . Tato zjištěná frekvence byla rovněž vyhodnocena vizualizací (viz [9, 14]). Při zapnutí řídicího proudu graf spektrální výkonové hustoty podstatně změnil svůj charakter. Především dochází k výraznému nárůstu hodnot ve spektru. Vlivem řízení se v proudu objevuje nová dominantní frekvence, tedy frekvence řídicího proudu. Řízení také způsobí změnu tvaru spektra, kde pro frekvence od  $f = 100$  Hz lze vidět, že dochází k poklesu hodnot spektrální výkonové hustoty. Sklon klesající části lze aproximovat čarou  $PSD \approx f^{-5/3}$ , jak je obvyklé pro turbulentní proudy (viz [15, 16, 17]), což naznačuje, že vlivem řízení přešel původně laminární proud do turbulence. Srovnáme-li

spektrum řízeného proudu v tomto místě se spektrem téhož proudu v ústí trubice, vidíme, že zatímco v ústí převažuje vliv uspořádaných struktur, zde je proud již turbulentní.

Obrázek 4a) ukazuje graf spektrální výkonové hustoty proudu s  $Re = 5500$  ve vzdálenosti  $y/D = 0$  bez řízení a s řízením. Řídící proud měl frekvenci  $f = 230$  Hz (tomu odpovídá  $St = 0,27$ , dle rovnice (10)). Je vidět, že proud bez řízení má spektrum typické pro turbulentní proudy (sklon  $PSD \approx f^{-5/3}$  je pro názornost v obrázku také uveden) bez dominantních frekvencí. U proudu řízeného je ve spektru viditelná základní frekvence řídicího proudu ( $f = 230$  Hz) a její první násobek, ale celkový tvar spektra zůstává stejný jako u proudu neřízeného.

Obr. 4b) ukazuje graf spektrální výkonové hustoty na ose proudu s  $Re = 5500$  ve vzdálenosti  $y/D = 6,2$  bez řízení a s řízením. Parametry řídicího proudu jsou stejné jako u proudu z Obr. 4a). Z obrázku je zřejmé, že spektra proudu řízeného a neřízeného se v tomto případě téměř neliší. U proudu řízeného lze ve spektru pozorovat nárůst hodnot v okolí budící frekvence, tento nárůst zde ovšem není příliš výrazný. Oba proudy jsou turbulentní, tvar spekter zůstává stejný, jako byl na výstupu z trubice (viz Obr. 4a)). Od spekter v ústí trubice se ale liší nárůstem hodnot PSD v celém rozsahu frekvencí.

Vzdálenost  $y/D = 6,2$  byla pro vyhodnocení grafů spektrální výkonové hustoty na Obr. 3b) a 4b) zvolena záměrně. Toto místo na ose odpovídá oblasti za koncem potenciálního jádra proudu. Konec potenciálního jádra je obvykle uváděn ve vzdálenosti  $y/D = (4\div 5)$  (viz [18]). V tomto místě by měl být proud nejcitlivější na buzení s  $St = 0,3$  (jak bylo zmíněno výše v části 2.1). Proto i frekvence řídicího proudu byla v obou ukázaných případech řízení volena tak, aby Strouhalovo číslo bylo přibližně  $St = 0,3$  (viz Tabulka 2).

Z grafu na Obr. 3b) je vidět, že ačkoli přirozená frekvence kontinuálního proudu je poněkud vyšší, než byla frekvence řídicího proudu, řízení má na hlavní proud výrazný vliv. Tento vliv je výrazný také proto, že hlavní proud je v této vzdálenosti už velmi nestabilní a malé poruchy stačí k jeho přechodu do turbulence.

Oproti tomu řízení s  $St = 0,3$  u kontinuálního proudu s  $Re = 5500$  nemá na spektra proudu téměř žádný vliv, jak ukazuje Obr. 4b).

## 6. Závěr

Tato práce se zabývala ukázkami grafů spektrální výkonové hustoty (PSD) syntetizovaného, kontinuálního a aktivně řízeného kontinuálního proudu.

U osově symetrického syntetizovaného proudu byla ukázána kvalitativní změna ve spektrech, která nastává v okolí hranice existence syntetizovaného proudu. Bylo ukázáno, že pro tento konkrétní případ je hraniční hodnota bezrozměrné délky zdvihu  $L_0/D_{SJ}$  vyšší, než je obvykle uváděná hodnota  $L_0/D_{SJ} = 0,5$ . Na základě tohoto experimentu bylo ukázáno, že proud s frekvencí  $f = 230$  Hz a příkonem  $P = 2,0$  W leží v dostatečné vzdálenosti od hranice existence a proud s těmito parametry lze dále použít pro následné experimenty.

Druhá část práce se zabývala osově symetrickým kontinuálním proudem, který byl aktivně řízen pomocí anulárního syntetizovaného proudu. Byly zkoumány proudy o Reynoldsově čísle 1600 a 5500, které byly řízeny se Strouhalovým číslem  $St = 0,3$ . Bylo ukázáno rozložení spektrální výkonové hustoty proudů řízených i neřízených na výstupu z trubice a za koncem potenciálního jádra. Experimenty ukázaly výrazný vliv řízení na proud s  $Re = 1600$ . Tento proud vlivem řízení přechází do turbulence. Naopak u proudu s  $Re = 5500$  nebyl vliv řízení na rozložení spektrální výkonové hustoty nalezen.

*Poděkování:*

*Tato práce vznikla při řešení projektu GA ČR (P101/11/J019) a s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO:61388998 a s podporou projektu TAČR – Centra kompetence, kód projektu TE01020036.*

## Seznam symbolů

$c_m$	poměr průtočných hybností – viz rovnice (13)	[1]
$c_q$	poměr objemových toků – viz rovnice (12)	[1]
$c_u$	poměr rychlostí – viz rovnice (14)	[1]
CTA	anemometr pracující v režimu konstantní teploty ( <i>Constant Temperature Anemometry</i> )	
$D$	průměr	[m]
$D_{SJ}$	průměr výstupního otvoru osově symetrického syntetizovaného proudu	[m]
$f$	frekvence	[Hz]
$L_0$	délka zdvihu	[m]
$P$	příkon, výkon	[W]
PSD	označení spektrální výkonové hustoty (angl. <i>Power Spectral Density</i> )	$[V^2 \cdot s, m^2 \cdot s^{-1}]$
$r$	radiální souřadnice	[m]
$S_{xx}$	spektrální výkonová hustota dle rovnice (17)	$[V^2 \cdot s, m^2 \cdot s^{-1}]$
$t$	čas	[s]
$T$	doba periody	[s]
$T_E$	vyfukovací část periody	[s]
$u_0$	rychlost syntetizovaného proudu v ústí otvoru jeho generátoru	$[m \cdot s^{-1}]$
$U_m$	střední rychlost stacionárního proudu na výstupu z trubice	$[m \cdot s^{-1}]$
$U_0$	časově střední rychlost na ose syntetizovaného proudu během celé periody určená z vyfukovací části jeho periody $T_E$ , dle rovnice (4)	$[m \cdot s^{-1}]$
$\bar{U}$	časově střední rychlost na ose syntetizovaného proudu během vyfukovací fáze určená z vyfukovací části jeho periody $T_E$	$[m \cdot s^{-1}]$
$x$	axiální souřadnice generátoru osově symetrického syntetizovaného proudu	[m]
$y$	axiální souřadnice osově symetrického kontinuálního proudu	[m]
$\nu$	kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$Re$	Reynoldsovo číslo dle rovnice (1)	[1]
$Re_H$	Reynoldsovo číslo dle rovnice (5)	[1]
$St_0$	Strouhalovo číslo dle rovnice (2)	[1]
$St_H$	Strouhalovo číslo dle rovnice (6)	[1]
$S_H$	Stokesovo číslo dle rovnice (7)	[1]

## Seznam použité literatury

- [1] B. L. Smith, A. Glezer, The Formation and Evolution of Synthetic jets. *Physics of Fluids*. 1998, vol. 10, no. 9, pp. 2281-2297.
- [2] R. Holman, Y. Utturkar, R. Mittal, B.L. Smith, L. Cattafesta, Formation Criterion for Synthetic Jets. *AIAA Journal*. 2005, vol. 43, no. 10, pp. 2110-2116.
- [3] Z. Broučková, P. Šafařík, Z. Trávníček, Oblast parametrů syntetizovaných proudů. Fluid Mechanics and Thermodynamics - Proceedings of Student' Work in the Year 2010/2011, Eds.: J. Ježek, J. Nožička, J. Adamec, P. Šafařík, ČVUT, Praha, 2011, s. 23-38.
- [4] Z. Trávníček, Z. Broučková, J. Kordík, Formation Criterion for Axisymmetric Synthetic Jets at High Stokes Numbers. *AIAA Journal*. 2012, vol. 50, no. 9, pp. 2012-2017.
- [5] E.V. Vlasov, A.S. Ginevskii, The Aeroacoustic Interaction Problem (review), Soviet Physics - Acoustics. 1980, vol. 26, no. 1, pp. 1-7.

- [6] D. E. Parekh, A. B. Cain, C. N. Vaporean, Characterization of Receptivity in Jet Flow Control. Final Technical Report 1994–97, Oct. 31 1997, McDonnell Douglas Corporation, St. Luis, Missouri, USA.
- [7] S. C. Crow, F. H. Champagne, Orderly Structure in Jet Turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 1971, vol. 48, part 3, pp. 547-591.
- [8] J. Noskievič *et al.*, *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1987. 356 s.
- [9] Z. Broučková, Aktivní řízení proudu v koaxiálním uspořádání, Diplomová práce, FS ČVUT v Praze, 2012.
- [10] MATLAB, manuál softwaru.
- [11] S. Miláček, *Náhodné a chaotické jevy v mechanice*. Skripta, vydavatelství ČVUT v Praze, 2003.
- [12] B. Vukasinovic, A. Glezer, S. Gordeyev, E. Jumper, W. W. Bower, Flow control for aero-optics application. *Exp. Fluids*, 2013, vol. 54, no. 3, 54:1492-1-18.
- [13] V. Tesař, J. Kordík, Spectral Analysis of a Synthetic Jet. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011, vol. 167, pp. 213 – 225.
- [14] Z. Broučková, Z. Trávníček, P. Šafařík, Active Control of the Jet in Coaxial Arrangement. In: *Experimental Fluid Mechanics 2012*, TU Liberec, Hradec Králové, pp. 102–107.
- [15] J. Jiménez, The Contributions of A. N. Kolmogorov to the Theory of Turbulence. *Arbor-Ciencia Pensamiento y Cultura*, 2004, vol. 178, pp. 589-606.
- [16] A.N. Kolmogorov, On the Degeneration of Isotropic Turbulence in an Incompressible Viscous Fluids (К вырождению изотропной турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости), *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 1941, vol. 31, pp. 538-541.
- [17] A.N. Kolmogorov, Dissipation of Energy in Isotropic Turbulence. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 1941, vol. 32, pp. 19-21; podle citace J. Jiménez, 2004 [14].
- [18] R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Florida: Krieger Publishing Company, 2003.