

Emil SMYK

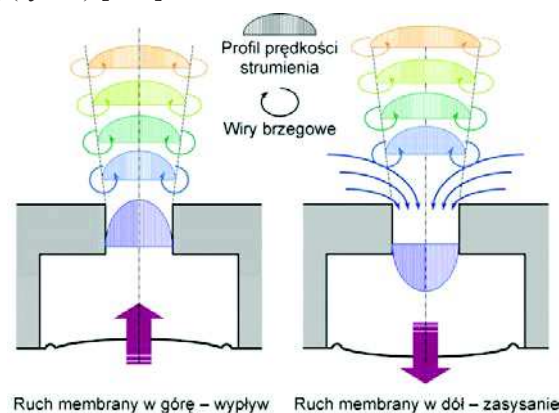
METODA PORÓWNIANIA WPLYWU ZMIANY PARAMETRÓW ZAWORU OSIOWOSYMETRYCZNEGO NA JEGO DZIAŁANIE

Streszczenie: W publikacji zaproponowano metodę doboru parametrów pracy zaworu/dyszy osiowosymetrycznej z wbudowanym generatorem strumieni syntetyzowanych. Najczęściej dobór taki jest wykonywany organoleptycznie, a więc subiektywnie. W związku z tym konieczne jest stworzenie metody pozwalającej na obiektywny wybór najkorzystniejszych parametrów pracy zaworu. Zaproponowano więc współczynnik przesterowania, służący do porównania wpływu różnych ustawień zaworu na strumień główny.

Słowa kluczowe: strumienie syntetyzowane, ZNMF, dysza osiowosymetryczna

1. WSTĘP

Strumienie syntetyzowane powstają na skutek naprzemiennego wtłaczania i wytłaczania płynu roboczego przez dyszę do zamkniętej przestrzeni zwanej komorą roboczą (rys. 1) [3, 7].



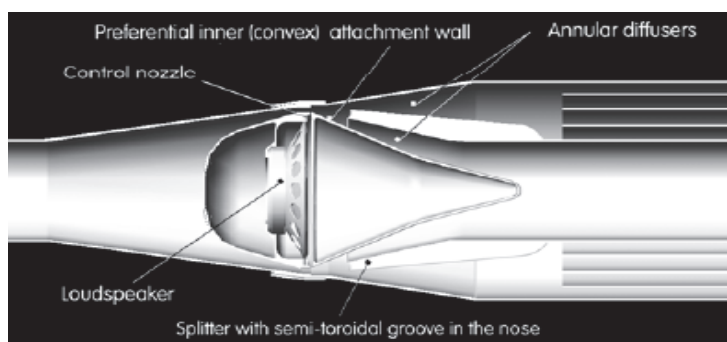
Rys. 1. Idea powstawania strumieni syntetyzowanych w generatorze z membraną
Fig. 1. Idea of synthetic jet formation in actuator with diaphragm

Proces ten realizowany jest poprzez zastąpienie jednej ze ścian komory ruchomym elementem (np. tłokiem, membraną) [3, 6], najczęściej poruszającym się ruchem sinusoidalnym. Pomimo że uśredniony w czasie przepływ w dyszy jest zerowy, to w odpowiedniej odległości od wylotu szereg wypływów tworzy

niezerowy strumień objętości. Jest on wynikiem „syntetyzowania” wirów brzegowych powstających na obwodzie wypływającego z dyszy płynu. Stąd nazwa strumienia syntetyzowane (ang. *synthetic jet*).

Strumienie syntetyzowane znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach techniki jak np. astronautyce, lotnictwie, elektronice (w układach chłodzących) itp. Jednym z bardziej interesujących zastosowań strumieni syntetyzowanych jest aktywne sterowanie strumieniami, a w szczególności możliwość skonstruowania pewnego typu zaworu [4, 5, 6] (rys. 2).

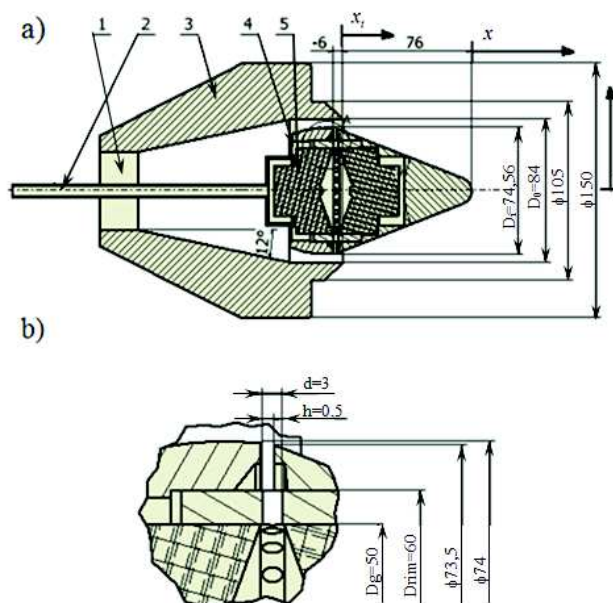
Zawór ten składa się z dyszy osiowosymetrycznej z rdzeniem, w którym zamontowano generator strumieni syntetyzowanych (ang. *synthetic jet actuator*) (rys. 3). Generator zbudowany jest z komory roboczej w kształcie walca, gdzie zamiast podstaw zamontowano głośniki o średnicy $D_g = 50$ mm, natomiast na obwodzie generatora zostały wykonane 24 otwory o średnicy $d = 3$ mm. Pozostałe wymiary stanowiska zostały podane na rysunku 3. Warto zaznaczyć, że istnieje możliwość przemieszczenia rdzenia dyszy, co zostało zobrazowane na rysunku 3 jako wartość x_r . W przedstawionym przypadku rdzeń 4 jest wsunięty w dyszę 3 na głębokość $x_r = -6$ mm, co oznacza, że wylot strumieni syntetyzowanych b jest wsunięty na głębokość 6 mm w dyszę.



Rys. 2. Przykład osiowosymetrycznej kierownicy strumieni (zaworu) [4]
Fig. 2. Example of an axisymmetric fluidic valve [4]

W stanie normalnej pracy powietrze (strumień główny), dopływające przez wlot 1, w wyniku efektu Coandy przylega do stożka rdzenia 4, w którym zamontowany jest, wcześniej opisany, generator strumieni syntetyzowanych. W takim stanie praktycznie cały strumień główny przepływa wzdłuż stożka rdzenia. W tym przypadku formowany jest strumień o stosunkowo dużej prędkości i małym przekroju. Podczas gdy załączony zostanie generator, strumienie syntetyzowane wypływające przez szczelinę b „odpychają” strumień główny w wyniku czego przylega on do stożka zewnętrznego. Formowany jest strumień o przekroju pierścieniowym i stosunkowo małej prędkości wypływu. Po to, aby zjawisko to nastąpiło, energia strumieni syntetyzowanych musi pokonać siły adhezji występujące na styku strumienia głównego i stożka rdzenia 4. W tym miejscu należy zaznaczyć, że intensywność efektu Coandy, a więc siły adhezji

zależą nie tylko od właściwości fizycznych płynu, ale również od liczby Reynoldsa, chropowatości powierzchni stożka wewnętrznego, jego kąta itp.



Rys. 3. Dysza osiowosymetryczna z generatorem strumieni syntetyzowanych: a) 1 – wlot, 2 – kanał zasilania generatora, 3 – dysza osiowosymetryczna, 4 – generator strumieni syntetyzowanych, 5 – głośniki; b) szczegół generatora

Fig. 3. Annular nozzle with synthetic jet actuator: a) 1 – flow inlet, 2 – actuator's supply channel, 3 – annular nozzle, 4 – synthetic jet actuator, 5 – loudspeakers; b) actuator detail

1.1. Wskaźniki sterowania

Istotne ze względów użytkowych jest opracowanie wskaźników dających jednoznaczne informacje na temat parametrów pracy badanego urządzenia oraz możliwość porównania różnych typów generatorów strumieni syntetyzowanych ze sobą [1, 2]. W pracy [1, 2] zaproponowano zastępujące współczynniki:

- stosunek prędkości:

$$c_u = \frac{U_0}{U_m} \quad (1)$$

gdzie:

- U_m – uśredniona w czasie prędkość strumienia głównego w szczelinie pierścieniowej dyszy,
- U_0 – uśredniona w czasie prędkość strumieni syntetyzowanych na wylocie generatora, zależna od części okresu, w której powietrze jest wytlaczane z generatora.

Uśredniona w czasie prędkość strumieni syntetyzowanych wynosi:

$$U_0 = f \int_0^{T_E} u_0(t) dt \quad (2)$$

gdzie:

- T_E – czas wytlaczania powietrza,
- f – częstotliwość pracy generatora.

- stosunek strumieni objętości przepływu:

$$c_q = \frac{U_0}{U_m} \frac{A_{Sj}}{A} \quad (3)$$

tutaj

$$A_{Sj} = b \cdot \pi D_i \quad (4)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_i^2) \quad (5)$$

gdzie:

- A_{Sj} – pole przekroju szczeliny, przez którą wypływa strumień syntetyzowany,
- A – pole przekroju dyszy w miejscu oddziaływania strumieni syntetyzowanych na strumień główny.

Wymiary charakterystyczne dyszy i generatora (D_0 , D_i) występujące we wzorach (4) i (5) zostały przedstawione na rysunku 3. Powyższe współczynniki zostały szerzej omówione w pracy [1, 2]. Określają one stosunek prędkości i strumienia objętości strumieni syntetyzowanych oraz strumienia głównego. Dzięki temu pozwalają na powtórzenie eksperymentu w innych warunkach (jako liczby podobieństwa) oraz umożliwiają porównanie ze sobą różnych generatorów stosowanych w konkretnym doświadczeniu. Nie dają jednak informacji o tym jak ustawienie oraz dobór parametrów pracy danego generatora wpływa na przesterowanie strumienia głównego.

W pracach [1, 2] profil prędkość strumienia głównego dla dyszy osiowosymetrycznej mierzony jest w odległości 40 mm i 80 mm od rdzenia dyszy (rys. 3 parametr x). Rozkład prędkości strumienia głównego zależy od mocy zasilania generatora oraz położenia rdzenia. Dobór tych parametrów odbywał się dotychczas poprzez wzrokowe porównanie wykresów profili prędkości. Ze względów użytkowych należałoby wyznaczyć parametr pozwalający na porównanie przesterowania strumienia głównego. W związku z tym zaproponowano metodę składającą się z następujących kroków:

- wyznaczenia średniej wartości prędkości powietrza \bar{u} dla danego ustawienia (średnia obliczona na podstawie zmierzonego profilu prędkości strumienia głównego w odległości $x = 40$ mm);
- wyznaczenia objętościowego natężenia przepływu \dot{V} na podstawie zmierzonego profilu prędkości, dla danego ustawienia (wyznaczenie pola pod wykresem profilu prędkości);
- wyznaczenia współczynnika przesterowania względnego c_V poprzez podzielenie objętościowego natężenia przepływu \dot{V} przez prędkość średnią \bar{u} .

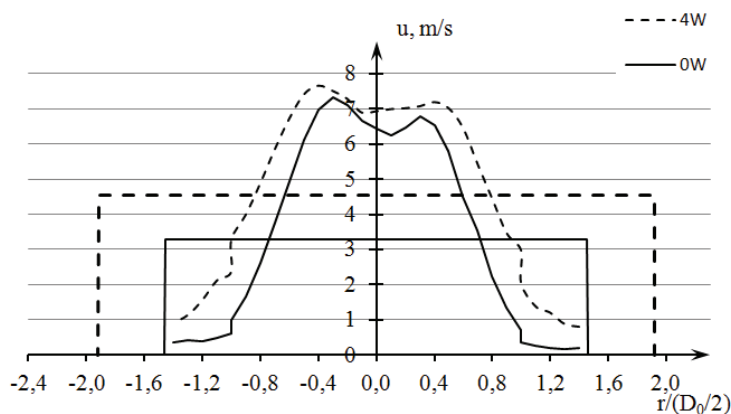
W ten sposób zmierzony profil prędkości powietrza można przedstawić jako prostokąt o wysokości równej co do wartości średniej, prędkości powietrza i długości podstawy rozumianej jako wartość c_V zależnej od profilu (rys. 4).

Ponieważ objętościowe natężenie przepływu \dot{V} (pole pod wykresem profilu prędkości) jest różne w zależności od mocy zasilania generatora (wprowadzenie dodatkowej energii), wprowadzono dodatkowo współczynnik wielkości x , obliczony ze wzoru:

$$x = \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_i} \quad (6)$$

gdzie:

- \dot{V}_0 – natężenie przepływu dla danego ustawienia przy wyłączonym generatorze,
- \dot{V}_i – natężenie przepływu dla danego ustawienia przy zasilanym generatorze.



Rys. 4. Profil prędkości i reprezentacja współczynnika c_V dla $x_t = 3$ mm
 Fig. 4. Velocity profile and representation of ratio c_V for $x_t = 3$ mm

Następnie należy podzielić współczynnik przesterowania względnego c_V przez współczynnik x , co pozwala na wyznaczenie współczynnika przesterowania $c_{\bar{v}}$:

$$c_{\bar{v}} = \frac{c_V}{x} = \frac{\dot{V}_i \dot{V}_i}{\bar{u}_i \dot{V}_0} = \frac{\dot{V}_i^2}{\dot{V}_0 \bar{u}_i} \text{ m}^2 \quad (7)$$

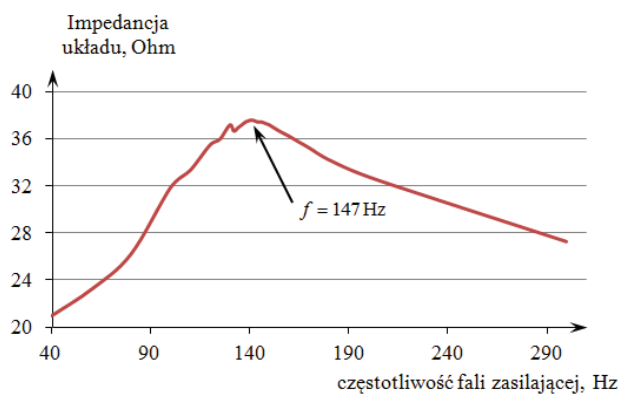
Należy zaznaczyć, że określenie parametrów opisujących warunki pracy generatora (c_u , c_q) oraz oddziaływanie strumieni syntetyzowanych na strumień główny ($c_{\bar{v}}$) ma bezpośredni wpływ na możliwość zastosowania układu przedstawionego na rysunku 3. Dotychczas nie ustalono, w jednoznaczny sposób, jaki parametr mógłby służyć do określenia przesterowania strumienia głównego w dyszy osiowoosymetrycznej, poprzez działanie strumieni syntetyzowanych. Prace [1, 2, 5, 6] nie dostarczają informacji, na jakiej zasadzie dobrano parametry w czasie badań tam przedstawionych.

2. BADANIA

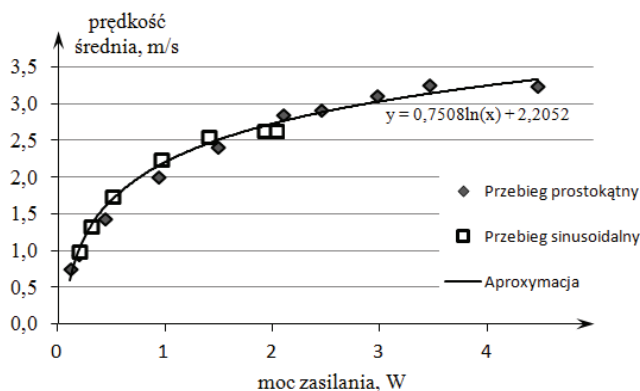
Jako elementy wykonawcze generatora zastosowano głośniki MONACOR SP-6/8SQ ($P_{MAX} = 20 \text{ W}$, $R = 8 \Omega$). Układ był zasilany za pomocą generatora funkcji RIGOL DG4162, poprzez wzmacniacz stereo SEOUM SA-3180B. Powietrze zasilające układ dostarczano przez pompę odśrodkową przy zachowaniu stałego natężenia przepływu dla wszystkich pomiarów. Prędkość powietrza mierzono za pomocą anemometru termicznego HWA (ang. *Hot-Wire Anemometer*) z zastosowaniem sondy jednodrutowej, stałotemperaturowej CTA (ang. *Constant Temperature Anemometer*) o numerze 55P16 firmy DANTEC. Przedstawione w pracy pomiary były prowadzone dla następujących parametrów powietrza: temperatura bezwzględna $T = 295 \text{ K}$, ciśnienie otoczenia $p = 102500 \text{ Pa}$, wilgotność względna $\varphi = 45\%$.

2.1. Badania wstępne

W ramach badań wstępnych wyznaczono charakterystykę częstotliwościową badanego generatora i wyznaczono częstotliwość charakterystyczną pracy jako $f = 147 \text{ Hz}$ (rys. 5). Warto zaznaczyć, że generator strumieni syntetyzowanych był zasilany prądem o przebiegu sinusoidalnym oraz prostokątnym. Wyznaczono w ten sposób zależność prędkości strumieni syntetyzowanych od mocy zasilania generatora. Jak pokazano na rys. 6 prędkość strumieni syntetyzowanych praktycznie nie zależy od postaci prądu zasilającego (fala sinusoidalna lub prostokątna), a jedynie od mocy zasilania (rozkład logarytmiczny). Pozwala to na zastosowanie fali prostokątnej, w celu zwiększenia mocy pracy generatora, przy jednoczesnym utrzymaniu niskiej wypadkowej wartości natężenia prądu (natężenie prądu dla wybranych głośników nie może przekroczyć $I_{MAX} = 0,35 \text{ A}$).



Rys. 5. Charakterystyka częstotliwościowa generatora w zależności od impedancji układu
 Fig. 5. Characteristic frequency of actuator depending on the electrical impedance

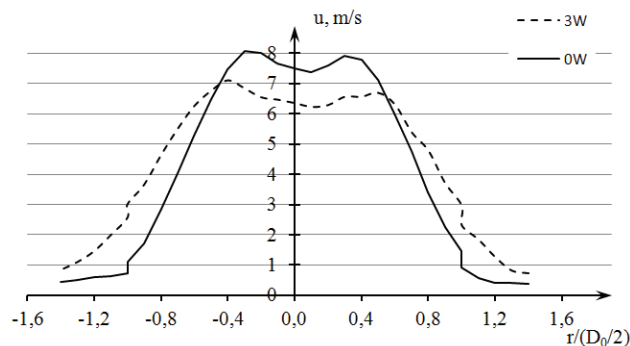


Rys. 6. Zależność prędkości U_0 od mocy zasilania oraz przebiegu prądu zasilającego
 Fig. 6. Dependence of velocity U_0 on the electrical power and the shape of the supply current

Na podstawie powyższych badań przyjęto, że wyznaczenie wskaźników sterowania zostanie przeprowadzone dla przebiegu prostokątnego o mocy 1, 2, 3 i 4 W.

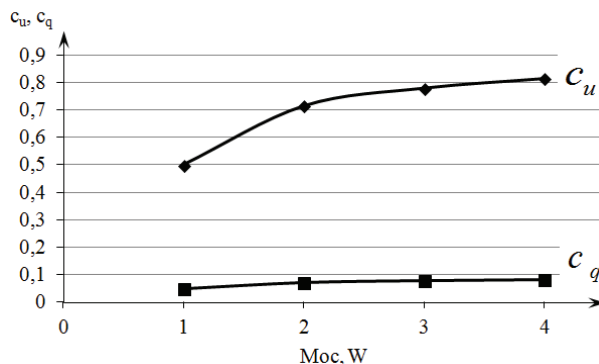
2.2. Badania właściwe

Na rysunku 7 przedstawiono wybrany ($P = 3$ W) rozkład prędkości strumienia głównego. Rozkład ten zbliżony jest do krzywej dzwonowej oraz zgodny z oczekiwaniami – zmniejszenie prędkości maksymalnej, rozszerzenie profilu. Zmiana profilu prędkości jest spowodowana zderzeniem się strumienia głównego oraz strumieni syntetyzowanych. Skutkuje to zwiększeniem turbulencji (zderzeniem się dwóch strumieni o różnym co do kierunku pędzie) oraz wprowadzeniem dodatkowej energii (w postaci pędu) do strumienia głównego. Energia ta przeciwdziała siłą adhezji pomiędzy strumieniem głównym a rdzeniem dyszy, co skutkuje rozszerzeniem profilu prędkości.



Rys. 7. Profil prędkości dla $x_t = 6$ mm przy wyłączonym i włączonym generatorze
 Fig. 7. Velocity profile for $x_t = 6$ mm, with and without switch on the actuator

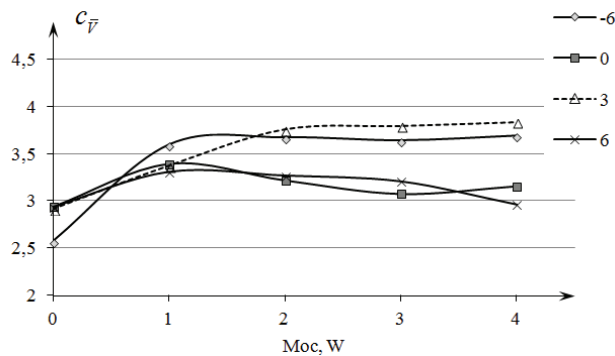
Na rys. 8 przedstawiono współczynniki c_u i c_q w zależności od mocy zasilania. Jak widać, obydwa współczynniki mają ten sam trend wzrostu. Jest to związane z bezpośrednią zależnością pomiędzy współczynnikami c_u i c_q od prędkości strumieni syntetyzowanych. Porównanie wskaźników powinno odbyć się w ramach porównania stanowiska badawczego z innym zawierającym inaczej skonstruowany rdzeń (generator). Mają one charakter informacyjny, a ich wyznaczenie jest konieczne do zapewnienia odtwarzalności i powtarzalności pomiarów.



Rys. 8. Współczynniki sterowania zależne od mocy zasilania generatora
 Fig. 8. Control ratio depending on the actuator power

Rys. przedstawia zależność współczynnika przesterowania $c_{\bar{p}}$, obliczonego dla zmierzonego profilu prędkości, w zależności od mocy zasilania i ustawienia rdzenia w dyszy. Najmniejsze wartości uzyskano dla profilu z wyłączonym sterowaniem. Natomiast najwyższe wartości współczynnika przesterowania $c_{\bar{p}}$ uzyskano dla ustawienia rdzenia w dyszy $x_t = 3$ mm, a następnie dla ustawienia $x_t = -6$ mm. Warto nadmienić, że zwiększanie mocy pracy generatora niekoniecznie prowadzi do zwiększenia przesterowania jak w przypadku usta-

wienia $x_t = 6$ mm. Może to być spowodowane nadmiernym zwiększeniem turbulencji przepływu w skutek niekorzystnego kształtu szczeliny pierścieniowej przy danym ustawieniu. Ponadto warto zauważyć, że zwiększanie mocy dla ustawień $x_t = 3$ mm i $x_t = -6$ mm powoduje stosunkowo niewielki wzrost współczynnika $c_{\bar{v}}$, ma bezpośredni związek z nieznacznym zwiększeniem prędkości strumieni syntetyzowanych U_0 przy zwiększeniu mocy powyżej $P = 2$ W (rys. 6).



Rys. 9. Zależność współczynnika $c_{\bar{v}}$ od mocy i ustawienia rdzenia dyszy

Fig. 9. Dependence of $c_{\bar{v}}$ ratio from the electric power and setups of nozzle core

Można zauważyć, że dalszy wzrost mocy zasilania nie ma wpływu na zmianę profilu prędkości strumienia głównego, a więc zmianę współczynnika przesterowania $c_{\bar{v}}$. W celu zwiększenia wpływu generatora na strumień główny należy przekonstruować generator bądź dyszę główną.

3. WNIOSKI

Analizy profilu prędkości strumienia głównego, dla różnych wartości x_t , przeprowadzone metodą organoleptyczną (porównanie wzrokowe) i metodą współczynnika przesterowania $c_{\bar{v}}$ okazały się ze sobą zgodne. Za ich pomocą udało się wyznaczyć najlepsze (ze zbadanych) ustawienie rdzenia w dyszy. Potwierdza to możliwość wykorzystania współczynnika przesterowania $c_{\bar{v}}$ do oceny wpływu ustawienia rdzenia w dyszy oraz mocy zasilania generatora na strumień główny.

Ponadto dla badanej dyszy wyznaczono współczynniki c_u oraz c_q . Mogą one służyć do porównania badanego stanowiska z innym [1, 2, 5] i dodatkowo ułatwiają one odtworzenie przedstawiony badań.

PODZIĘKOWANIA

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2015/2018 jako projekt badawczy w ramach programu pod nazwą „Diamentowy Grant”.

LITERATURA

- [1] BROUČKOVÁ Z.: Aktivní řízení proudu v koaxiálním uspořádání. Praca doktorancka, FS ČVUT Praga, 2012.
- [2] BROUČKOVÁ Z., KORDÍK J., TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V.: Aktivní řízení anulárního proudu radiálním syntetizovaným proudem. Materiały z konferencji: Topical problems of fluid mechanics, 2010.
- [3] MOHSENI K., RAJAT M., (eds.): Synthetic Jets: Fundamentals and Applications. CRC Press, 2014.
- [4] TESAŘ V.: Use of radially switched jet attachment in an exhaust gas flow control valve. Proc. WORKSHOP 95, Ann. University-Wide Seminar, Praga, 1995, 265-266.
- [5] TESAŘ V., PAVELKA M., SMYK E., PESZYŃSKI K.: Control of flow separation by vestigial “synthetic jet”, Colloquium Fluid Dynamics, Praga, 2014.
- [6] TESAŘ V., BROUČKOVÁ Z., KORDÍK J., TRÁVNÍČEK Z., PESZYŃSKI K.: Valves with flow control by synthetic jets. EDP Sciences, EPJ Web of Conferences 25, 2012, 1092.
- [7] TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V.: Annular synthetic jet used for impinging flow mass-transfer. International journal of heat and mass transfer 46(17), 2003, 3291-3297.
- [8] TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V.: Hysteretic behavior of annular impinging jets. 5th European Thermal-Sciences Conference, 2008.
- [7] TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V., BROUČKOVÁ Z., PESZYŃSKI K.: Annular impinging jet controlled by radial synthetic jets. Heat Transfer Engineering 35(16-17), 2014, 1450-1461.

METHOD OF INFLUENCE COMPARISON OF CHANGE OF AXISYMMETRIC VALVE PARAMETERS ON HIS OPERATION

Summary: This paper proposes a method for selecting the operation parameters of the valve/nozzle with build-in synthetic jet actuator. Mostly this selection is performed organoleptically, and therefore subjectively. Thus it is necessary to create a method to objectively choice most favorable operating parameters of the valve. In the study is proposed control ratio used to compare to influence of different settings of the valve on the main stream.

Key words: synthetic jet, ZNMF, axisymmetric nozzle