

Emil SMYK¹, Wojciech SZMYT², Dariusz MROZIK

ZAWÓR OSIOWOSYMETRYCZNY WYKORZYSTUJĄCY STRUMIENIE SYNTETYZOWANE

Streszczenie: W artykule opisano badania zaworu osiowosymetrycznego, który wykorzystuje w swojej konstrukcji dyszę osiowosymetryczną z siłownikiem strumienia syntetyzowanych wbudowanym w rdzeń dyszy. Strumienie syntetyzowane pełnią w zaworze funkcję strumienia sterującego. Przeprowadzony eksperyment wykazał, że utworzenie takiego zaworu jest możliwe, a spośród badanych warunków wykazano te, które spełniły postawione wymagania funkcjonowania zaworu: natężenie przepływu strumienia $Q = 0,0034 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i moc czynna siłownika $P = 3 \text{ W}$ (współczynnik prędkości $c_U = 1,07$) oraz natężenie przepływu strumienia $Q = 0,0028 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i moc czynna siłownika $P = 2 \text{ W}$ (współczynnik prędkości $c_U = 1,20$).

Słowa kluczowe: aktywne sterowanie strumieniami, zawór osiowosymetryczny, strumienie syntetyzowane

1. WSTĘP

Strumienie syntetyzowane powstają poprzez naprzemienne wtlaczanie i wytłaczanie medium roboczego (najczęściej powietrza lub wody) przez dyszę do zamkniętej komory. Odbywa się to poprzez zastąpienie jednej ze ścian komory ruchomym elementem, np. tłokiem, piezoelektrykiem lub membraną głośnika. Pomimo że uśredniony w czasie przepływ masy przez dyszę w czasie jednego cyklu pracy jest zerowy, to w pewnej odległości od dyszy tworzy się niezerowy strumień objętości płynu roboczego – między innymi wskutek tworzenia się na obrzeżach wytłoczonego z komory strumienia wirów brzegowych (rys. 1) [11, 14].

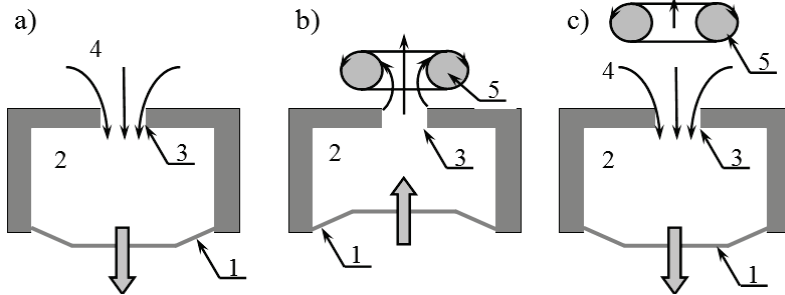
Problematyka strumieni syntetyzowanych należy do najbardziej rozwijanych zagadnień związanych z aktywnym sterowaniem strumieniami. Są także stosowane w wielu dziedzinach techniki oraz nauki, np. chemii [16], lotnictwie [2, 7], transporcie [5], chłodnictwie [1, 10] oraz szeroko pojętym sterowaniu przepływami i warstwą graniczną [3, 6, 8].

Strumienie syntetyzowane znalazły zastosowanie między innymi w różnego typu zaworach dwu- oraz trójwymiarowych [14, 15, 19]. Zawory tego typu należą do grupy zaworów płynowych, charakteryzujących się brakiem poruszających lub deformujących się elementów, co czyni je niezawodnymi. Ich działanie oparte jest na szeroko pojętej „czułości” strugi płynu, który reaguje poprzez zmianę kierunku przepływu. Z tego powodu zawory takie przeznaczone są dla przepływów o niewielkim natężeniu [17].

¹ dr inż. Emil SMYK, UTP Bydgoszcz, e-mail: emil.smyk@utp.edu.pl

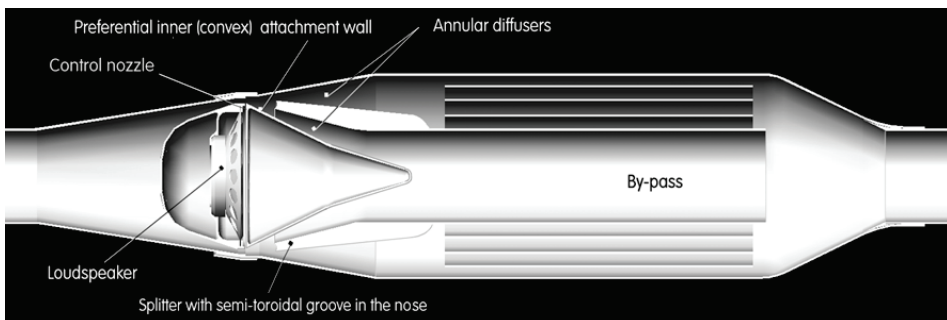
² inż. Wojciech SZMYT, UTP Bydgoszcz, e-mail: wszmyt@gmail.com

Zawór osiowosymetryczny sterowany strumieniami syntetyzowanymi, których generowanie przedstawiono schematycznie na rysunku 1, został pierwszy raz opisany, według wiedzy autorów, w patencie [18]. Na rysunku 2 przedstawiono wspomniany zawór. W przypadku gdy strumień sterujący (strumień syntetyzowany) jest wyłączony, strumień główny na skutek efektu Coandy „przykleja” się do stożka rdzenia dyszy. W związku z tym większość objętości strumienia głównego (sterowanego) przepływa przez kanał wewnętrzny – oznaczony jako by-pass. Zgodnie z powyższym opisem działania zaworów osiowosymetrycznych, w czasie gdy siłownik strumieni syntetyzowanych jest wyłączony, strumień główny płynie przez by-pass (rys. 2). Załączenie strumienia sterującego powoduje oderwanie się strumienia głównego od rdzenia dyszy i „przyklejenie” go do stożka zewnętrznego. W takim przypadku strumień przepływa przez kanał zewnętrzny, pierścieniowy.



Rys. 1. Generowanie strumieni syntetyzowanych: a) zassanie medium z otoczenia, b) wydmuch medium z komory roboczej oraz powstawanie na obrzeżach wydmuchiwanego strumienia wirów brzegowych, c) zassanie medium z otoczenia oraz oddalanie się strumienia generującego wiry brzegowe (1 – membrana, 2 – komora robocza, 3 – dysza siłownika, 4 – strumień zasysany z otoczenia, 5 – wiry brzegowe)

Fig. 1. Generation of synthetic jet: a) injection of the medium from the environment, b) expulsion of the medium from cavities and creation of edge vortex the edge of the expelled jets, c) injection of the medium from environment and the stream generating edge vortex is moving away (1 – diaphragm, 2 – cavity, 3 – actuator nozzle, 4 – jet injected from the environment, 5 – edge vortex)



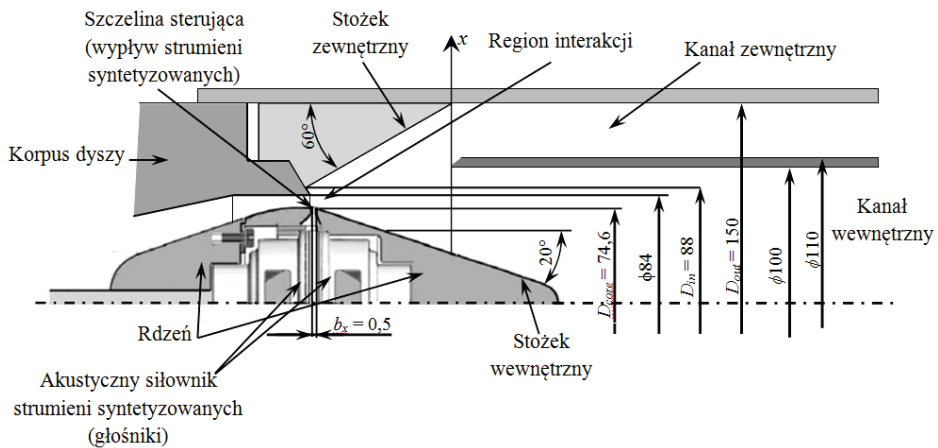
Rys. 2. Zawór osiowosymetryczny sterowany strumieniami syntetyzowanymi [18]

Fig. 2. Axisymmetric valve controlled by synthetic jets [18]

W artykule przedstawiono możliwość sterowania strumieniem głównym za pomocą strumieni syntetyzowanych w zaworze osiowosymetrycznym. Badania wykorzystanej do budowy zaworu dyszy osiowosymetrycznej oraz siłownika strumieni syntetyzowanych przedstawiono między innymi w [12, 13].

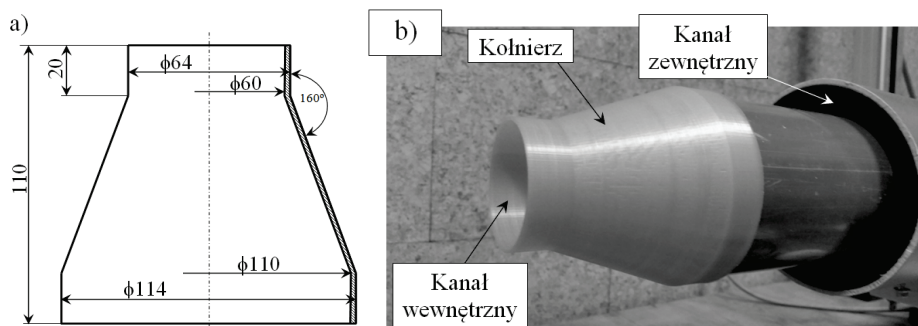
2. STANOWISKO BADAWCZE

Na rysunku 3 przedstawiono w sposób schematyczny budowę zaworu osiowosymetrycznego wraz z zaznaczonymi najważniejszymi elementami oraz wymiarami. Siłownik strumieni syntetyzowanych wbudowany w rdzeń dyszy składa się z dwóch umieszczonych naprzeciw siebie głośników pracujących w tej samej fazie, tzn. gdy jeden z głośników wykonuje ruch do przodu, powodując zmniejszenie objętości komory siłownika, drugi również wykonuje ruch powodujący zmniejszenie komory siłownika. Głośniki osadzone zostały w pierścieniu z dwudziestoma czterema otworami o średnicy $\phi 3$ mm. Pierścień został osadzony w rdzeniu dyszy w taki sposób, aby powstała szczelina o szerokości 0,5 mm. Za jednym z głośników znajduje się zamknięta komora. Wpływ komory na generowane strumienie syntetyzowane omówiono w pracy [12].



Rys. 3. Schemat zaworu osiowosymetrycznego z zaznaczonymi najważniejszymi elementami
Fig. 3. Schema of axisymmetric valve with marked the most important elements

Kanał zewnętrzny zaworu ma kształt pierścieniowy o średnicy wewnętrznej $\phi 110$ mm oraz średnicy zewnętrznej $\phi 150$ mm. Kanał wewnętrzny ma średnicę $\phi 100$ mm. Długość kanału zewnętrznego wynosi 350 mm, natomiast kanału wewnętrznego 500 mm. Dodatkowo na końcu kanału wewnętrznego zamieszczono kołnierz pomiarowy o łącznej długości 110 mm, średnicy końcowej 60 mm oraz kącie rozwarcia 160° . Rysunek oraz zdjęcie zamontowanego kołnierza przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Kolnierz pomiarowy: a) rysunek, b) zdjęcie kolnierza zamontowanego na kanale wewnętrznym

Fig. 4. Measuring collar: a) drawing, b) picture of the measuring collar mounted on the inner channel

Jako elementy wykonawcze siłownika 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. Układ zasilano prądem o przebiegu sinusoidalnym i częstotliwości $f = 147 \text{ Hz}$, odpowiadającej częstotliwości naturalnej stosowanego siłownika. Zawór zasilany był z wykorzystaniem wentylatora odśrodkowego.

Pomiar prędkości powietrza strumienia głównego przeprowadzono z użyciem anemometru wiatrakowego TEST 491 o średnicy pomiarowej $\phi 60 \text{ mm}$, w zakresie pomiarowym $u = 0,2 \pm 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i dokładności $\pm 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ lub $\pm 2,5\%$ (w zależności która wartość jest większa). W przypadku odchyłu osi pomiarowej sondy od osi przepływu powietrza o 10% błąd pomiaru wynosi dodatkowo $\pm 3\%$ wartości zmierzonej. W trakcie pomiarów sonda anemometru wiatrakowego utwierdzona została na wylocie kolnierza – kanał wewnętrzny.

Pomiar prędkości strumieni syntetyzowanych odbywał się z użyciem anemometru termicznego HWA firmy Dantec Dynamics z zamontowaną sondą jednodrutową 55P16.

3. BADANIA I ANALIZA WYNIKÓW

Badania można podzielić na dwie zasadnicze części. Podczas badań wstępnych wyznaczono charakterystykę siłownika strumieni syntetyzowanych. W tym celu zmierzono prędkość charakterystyczną siłownika (w funkcji częstotliwości prądu zasilającego), którą można obliczyć na podstawie wzoru:

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

gdzie:

- T – okres pracy siłownika [s],
- T_E – czas wytlaczania powietrza z siłownika [s],
- $u(t)$ – prędkość chwilowa strumienia w szczelinie siłownika [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Główną częścią eksperymentu było badanie strumienia głównego, które można podzielić na następujące etapy:

- założenie zaślepki na kanał zewnętrzny,
- badanie strumienia objętości przepływającego przez dyszę – pomiar prędkości średniej w kanale wewnętrznym,
- zdjęcie zaślepki z kanału zewnętrznego,
- pomiar prędkości średniej w kanale wewnętrznym,
- załączenie siłownika strumieni syntetyzowanych,
- pomiar prędkości średniej w kanale wewnętrznym.

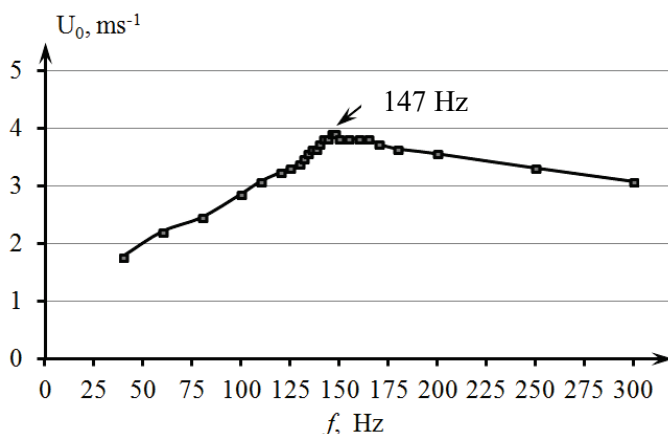
Badania przeprowadzono dla sześciu różnych natężeń przepływu strumienia przez dyszę oraz trzech różnych mocy czynnych zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych (moc czynna $P = 0$ W oznacza wyłączony siłownik).

Jako warunek wystarczający do uznania, że istnieje możliwość sterowania strumieniem głównym za pomocą strumieni syntetyzowanych, uznano sytuację, gdy:

- 1) co najmniej 90% objętości strumienia przepływa przez kanał wewnętrzny, gdy siłownik jest wyłączony ($P = 0$);
- 2) co najmniej 75% objętości strumienia przepływa przez kanał zewnętrzny, gdy siłownik jest włączony.

3.1. Badania siłownika strumieni syntetyzowanych

Pierwszym etapem badań było wyznaczenie charakterystyki stosowanego siłownika strumieni syntetyzowanych. W tym celu wyznaczono zależność prędkości charakterystycznej strumieni (opisanych zależnością (1)) od częstotliwości prądu zasilającego siłownik. W czasie pomiarów sonda ciepłodrutowa umieszczona była w odległości 1 mm od wylotu strumieni syntetyzowanych. Charakterystykę przedstawiono na rysunku 5.

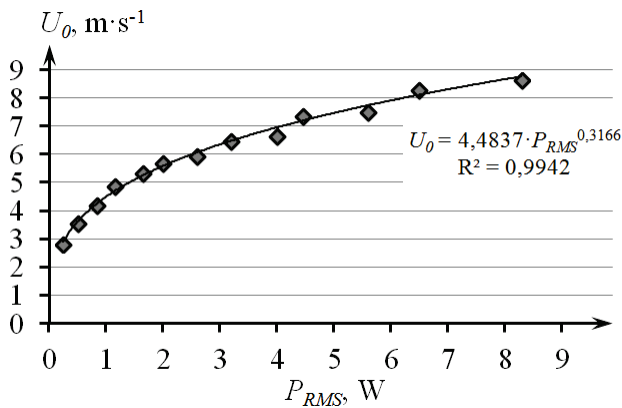


Rys. 5. Charakterystyka pracy siłownika przy mocy czynnej prądu zasilającego $P = 1$ W

Fig. 5. Operation characteristics of the actuator, at the active power of the power supply $P = 1$ W

Największą wartość prędkości charakterystycznej strumieni syntetyzowanych osiągnięto dla częstotliwości prądu zasilającego $f = 147$ Hz. Jest to tak zwana częstotliwość charakterystyczna, która odpowiada częstotliwości Helmholtza lub częstotliwości naturalnej siłownika.

Na potrzeby dalszych badań wyznaczono dodatkowo zależność prędkości charakterystycznej od mocy prądu zasilającego siłownik. Zależność tę przedstawiono na rysunku 6, dodatkowo na punkty pomiarowe naniesiono krzywą aproksymacji o równaniu potęgowym. Prędkość charakterystyczna jest tym wyższa, im wyższa jest moc czynna prądu zasilającego siłownik.



Rys. 6. Prędkość charakterystyczna strumieni syntetyzowanych w funkcji mocy czynnej zasilania siłownika dla częstotliwości prądu zasilającego $f = 147$ Hz

Fig. 6. Characteristic velocity of synthetic jet in the function of active power supply of actuator, by frequency of power supply $f = 147$ Hz

3.2. Badania strumienia głównego

W tabelach 1 i 2 przedstawiono wartości natężenia przepływu strumienia głównego Q , prędkość średnią $\bar{u}_{in}$ strumienia w kanale wewnętrznym oraz obliczone na tej podstawie wartości natężenia przepływu w kanale wewnętrznym Q_{in} i kanale zewnętrznym Q_{out} . Pomiarzy przeprowadzono dla wartości mocy czynnej zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych $P = 0$ oraz $P = 2$ W (tabela 1) i $P = 3$ W (tabela 2).

Natężenie przepływu w kanale zewnętrznym Q_{out} obliczone zostało jako różnica pomiędzy natężeniem przepływu strumienia głównego Q a natężeniem przepływu strumienia w kanale wewnętrznym Q_{in} .

Tabela 1. Wartości objętościowego natężenia przepływu w kanale wewnętrznym Q_{in} i zewnętrznym Q_{out} dla różnych wartości natężeń przepływu strumienia głównego i wartości mocy czynnej zasilania siłownika $P = 0$ oraz $P = 2$ W

Table 1. Values of the volume flow rate in the internal duct Q_{in} and external Q_{out} for different values of the main stream flow rates and active power values of the actuator power supply $P = 0$ and $P = 2$ W

$Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$P = 0$			$P = 2 \text{ W}$		
	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
0,0034	1,1	0,0031	0,0003	1,1	0,0031	0,0003
0,0028	0,9	0,0025	0,0003	0	0,0000	0,0028
0,0023	0,7	0,0020	0,0003	0	0,0000	0,0023
0,0020	0,5	0,0014	0,0006	0,2	0,0006	0,0014

Tabela 2. Wartości objętościowego natężenia przepływu w kanale wewnętrznym Q_{in} i zewnętrznym Q_{out} dla różnych wartości natężeń przepływu strumienia głównego i wartości mocy czynnej zasilania siłownika $P = 0$ oraz $P = 3$ W

Table 2. Values of the volume flow rate in the internal duct Q_{in} and external Q_{out} for different values of the main stream flow rates and active power values of the actuator power supply $P = 0$ and $P = 3$ W

$Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$P = 0$			$P = 3 \text{ W}$		
	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
0,0045	1,5	0,0042	0,0003	1,5	0,0042	0,0003
0,0040	1,4	0,0040	0,0000	1,3	0,0037	0,0003
0,0034	1,1	0,0031	0,0003	0,2	0,0006	0,0028
0,0028	0,9	0,0025	0,0003	0,5	0,0014	0,0014
0,0023	0,7	0,0020	0,0003	0,6	0,0017	0,0006

W tabeli 3 wskazano (procentowo), jaka część strumienia głównego przepływa przez kanał wewnętrzny dla różnych wartości natężeń przepływu Q strumienia głównego oraz różnych wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych.

Należy zauważyć, że jedynie dla $Q = 0,0040 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ w przypadku wyłączono-ego siłownika strumieni syntetyzowanych cała objętość strumienia głównego przepływała przez kanał wewnętrzny. Uogólniając, im wyższa wartość natężenia przepływu Q strumienia głównego, tym więcej powietrza przepływało przez kanał wewnętrzny, a mniej przez kanał zewnętrzny. Ma to bezpośredni związek z intensywnością efektu Coandy. Im wyższa prędkość strumienia opływającego dane ciało, tym intensywniejszy jest efekt „przyklejania” się strumienia do powierzchni opływającego ciała [4], co zgadza się z przeprowadzonymi pomiarami.

Najkorzystniejszy efekt przesterowania strumienia głównego z kanału wewnętrznego do kanału zewnętrznego osiągnięto dla natężenia przepływu $Q = 0,0028 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q = 0,0023 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla mocy czynnej zasilania siłownika $P = 2 \text{ W}$. W tym miejscu należy jednak zaznaczyć, że minimalna wartość pomiarowa dla stosowanego anemometru wynosi $u_{min} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, co oznacza, że rzeczywista wartość może znacząco różnić się od przedstawionej w tabeli 1. W związku z tym w tabeli 3 po ukośniku podano wartość, którą otrzymano by dla wartości prędkości średniej w kanale wewnętrznym $\bar{u}_{in} = u_{min} = 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tym niemniej, w obydwu przypadkach przesterowanie strumienia jest wystarczające i co najmniej 75% objętości strumienia przepływa przez kanał zewnętrzny.

W przypadku gdy siłownik zasilany był mocą o wartości $P = 3$ W, co najmniej 75% strumienia głównego przepływało przez kanał zewnętrzny jedynie dla wartości objętościowego natężenia przepływu $Q = 0,0034 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. W pozostałych przypadkach wpływ strumienia sterującego na strumień główny był niewystarczający.

Tabela 3. Wartości objętościowego natężenia przepływu Q_{in} w kanale wewnętrznym w stosunku do całkowitego strumienia objętości Q strumienia głównego dla różnych wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych

Table 3. Values of volume flow rate Q_{in} in internal duct relative to the total volume flow Q main stream for different values of active power P_{RMS} of synthetic jet actuator supply

$Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}/Q \cdot 100\%$		
	0	2 W	3 W
0,0045	93,75	–	93,75
0,0040	100,00	–	92,86
0,0034	91,67	91,67	16,67
0,0028	90,00	0,00 / 20,00	50,00
0,0023	87,50	0,00 / 25,00	75,00
0,0020	71,43	28,57	–

W tabeli 4 przedstawiono parametry strumienia głównego oraz siłownika strumieni syntetyzowanych, dla których przesterowanie strumienia głównego było wystarczające, aby spełnić kryterium drugie (co najmniej 75% objętości strumienia przepływa przez kanał zewnętrzny, gdy siłownik jest włączony) i jednocześnie kryterium pierwsze (co najmniej 90% objętości strumienia przepływa przez kanał wewnętrzny, gdy siłownik jest wyłączony ($P = 0$)) – z wyjątkiem ustawienia $Q = 0,0023 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $P = 2$ W, gdzie nie jest spełniony pierwszy warunek (ponieważ przy wyłączonym siłowniku przez kanał wewnętrzny przepływało 87,5% objętości strumienia – jedynie 2,5 punktu procentowego poniżej wymagań – oraz jako jeden z trzech przypadków spełniał założenie drugie – przypadek ten został również uwzględniony). Dodatkowo w tabeli 4 przedstawiono uzyskane w tych przypadkach współczynniki prędkości c_U (definicja w tabeli).

We wszystkich rozpatrzonych przypadkach wartość współczynnika prędkości wynosi $c_U > 1$, a najniższą wartość przyjął dla $Q = 0,0034 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz $P = 3$ W.

Tabela 4. Stosunek prędkości c_U dla objętościowych natężeń przepływu Q strumienia przepływu i mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłowników, przy których co najmniej 75% objętości strumienia głównego przepływało przez kanał zewnętrzny

Table 4. Velocity ratio c_U for volume flow rate Q of main stream and active power P_{RMS} of actuator supply by which at least 75% of the main stream volume flows through the external duct

Objętościowe natężenie przepływu, $Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Prędkość średnia, $\bar{U}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Moc czynna P_{RMS}, W	Prędkość strumieni syntetyzowanych, $U_0, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Stosunek prędkości, $c_U = U_0 \cdot \bar{U}^{-1}$
0,0034	2,90	3	3,12	1,07
0,0028	2,39	2	2,86	1,20
0,0023	1,96	2	2,86	1,46

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań zaworu osiowosymetrycznego opartego na dyszy osiowosymetrycznej z siłownikiem strumieni syntetyzowanych wbudowanym w rdzeń dyszy. Dla sześciu różnych wartości objętościowego natężenia przepływu Q strumienia głównego i trzech różnych wartości mocy czynnej P_{RMS} siłownika strumieni syntetyzowanych zmierzono objętościowe natężenie przepływu w kanale wewnętrznym oraz kanale zewnętrznym. Wykazano, że im wyższa prędkość strumienia głównego, tym większy procent objętości strumienia przepływa przez kanał wewnętrzny przy wyłączonym siłowniku strumieni syntetyzowanych. Przedstawiono ponadto warunki pracy zaworu, przy których spełnione są założone kryteria działania:

- 1) co najmniej 90% objętości strumienia przepływa przez kanał wewnętrzny, gdy siłownik jest wyłączony ($P = 0$);
- 2) co najmniej 75% objętości strumienia przepływa przez kanał zewnętrzny, gdy siłownik jest włączony;

oraz wyznaczono dla tych parametrów stosunki prędkości c_U .

- $P = 3 \text{ W}$ dla $Q = 0,0034 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $c_U = 1,07$,
- $P = 2 \text{ W}$ dla $Q = 0,0028 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $c_U = 1,20$.

Wykazano w ten sposób, że istnieje możliwość skonstruowania zaworu osiowosymetrycznego wykorzystującego jako strumień sterujący strumienie syntetyzowane, który spełnia postawione założenia.

LITERATURA

- [1] CHAUDHARI M., PURANIK B., AGRAWAL A.: Effect of orifice shape in synthetic jet based impingement cooling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(2), 2010, 246–256.
- [2] CIURYLA M., LIU Y., FARNSWORTH J., KWAN C., AMITAY M.: Flight Control Using Synthetic Jets on a Cessna 182 Model. *Journal of Aircraft*, 44(2), 2007, 642–653.
- [3] FENG L.H., WANG J.J.: Modification of a circular cylinder wake with synthetic jet: Vortex shedding modes and mechanism. *European Journal of Mechanics – B/Fluids*, 43, Jan. 2014, 14–32.
- [4] GILCHRIST A.R., GREGORY-SMITH D.G.: Compressible Coanda wall jet: predictions of jet structure and comparison with experiment. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 9(3), Sep. 1988, 286–295.
- [5] KRIEG M., MOHSENI K.: Thrust characterization of a bioinspired vortex ring thruster for locomotion of underwater robots. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(2), 2008, 123–132.
- [6] LESCHZINER M.A., LARDEAU S.: Simulation of slot and round synthetic jets in the context of boundary-layer separation control. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1940), 2011, 1495–1512.
- [7] MAMITAY M., HONOHAN A., TRAUTMAN M., GLEZER A.: Modification of the aerodynamic characteristics of bluff bodies using fluidic actuators. *28th Fluid Dynamics Conference*, 1997.
- [8] MITCHELL G., BENARD S.E., COOPER R.: Interaction of synthetic jet with a thermal turbulent boundary layer. *Diss. Queens University Belfast*, 2007.
- [9] MOHSENI K., MITTAL E. (eds.): *Synthetic Jets: Fundamentals and Applications*. CRC Press, 2014.
- [10] SCHWICKERT M., NOSKA B.: LED Cooling in Harsh Environments with Synthetic Jet Technology. *LED – professional*, May/June 2011, 2–5.

- [11] SMITH B.L., GLEZER A.: Jet vectoring using synthetic jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 458, 2002, 1–34.
- [12] SMYK E.: Interference in axisymmetric synthetic jet actuator. *EPJ Web of Conference*, 143(2111), 2017.
- [13] SMYK E., WAWRZYNIAK S., PERCZYNSKI D., KOLBER P.: Axisymmetric valve with synthetic jet actuator. *Engineering Mechanics*, 2017, 886–889.
- [14] TESAŘ V., BROUČKOVÁ Z., KORDÍK J., TRÁVNÍČEK Z., PESZYNSKI K.: Valves with flow control by synthetic jet. *EPJ Web of Conferences*, 25, 2012, 1092.
- [15] TESAŘ V., PAVELKA M., SMYK E., PESZYNSKI K.: Control of flow separation by vestigal ‘Synthetic Jet’, *Conference Fluidic Dynamics*, 2014.
- [16] TESAŘ V., SMYK E.: Fluidic low-frequency oscillator with vortex spin-up time delay. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 90, 2015, 6–15.
- [17] TESAŘ V., SMYK E., PESZYNSKI K.: Fluidic oscillator with bistable turn-down amplifier. *Conference Fluidic Dynamics*, 2014.
- [18] TESAŘ V., TRÁVNÍČEK Z.: Způsob dvourežimového řízení průtoku tekutiny a zařízení provádění tohoto způsobu (Ways and means for two-regime control of fluid flow; in Czech), patent no. 303280, 2010.
- [19] TRÁVNÍČEK Z., TESAŘ V., BROUČKOVÁ Z., PESZYNSKI K.: Annular impinging jet controlled by radial synthetic jet. *Heat Transfer Engineering*, 35(16), 2014, 1–12.

AXISYMMETRIC VALVE USED SYNTHETIC JETS

Summary: The article presents research of an axisymmetric valve, which uses in its construction axisymmetric nozzle with synthetic jet actuator build-in the nozzle core. The synthetic jets perform the function of the control jet in the valve. The executed experiment shows, that the creation of this valve is possible and among the tested conditions, these indicated, which met the set requirements for valve operation: volume flow rate of stream $Q = 0.0034 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ and active power of actuator supply $P = 3 \text{ W}$ (velocity ratio $c_U = 1.07$) and volume flow rate of stream $Q = 0.0028 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ and active power of actuator supply $P = 2 \text{ W}$ (velocity ratio $c_U = 1.20$).

Key words: synthetic jet, ZNMF, axisymmetric nozzle