

**UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO –
PRZYRODNICZY**

im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORZKIEJ

**STEROWANIE STRUMIENIEM
OSIOWOSYMETRYCZNYM ZA POMOCĄ STRUMIENIA
SYNTETYZOWANEGO**

mgr inż. Emil Smyk

Promotor:

dr hab. inż. Kazimierz Peszyński, prof. UTP

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Mariusz Kaczmarek

Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

dr hab. inż. Szymon Grymek

Politechnika Gdańska

– Bydgoszcz, 2018 –

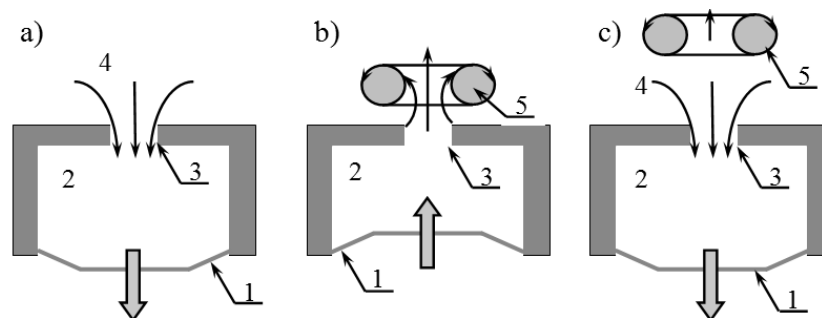
1. Wstęp

Sterowanie przepływem cieczy i gazów należy do podstawowych zagadnień mechaniki płynów. W zależności od metody można podzielić je na pasywne (bez doprowadzania energii do układu) oraz aktywne (z doprowadzeniem energii do układu). Sterowanie pasywne ogranicza się do stosowania kierownic przepływu, kształtowania powierzchni materiału lub geometrii danego obiektu. Ostatnio, zdecydowanie szersze zainteresowanie budzą metody aktywnego sterowania przepływem.

W metodach aktywnego sterowania strumieniami wykorzystuje się między innymi oscylatory pneumatyczne, gazogeneratory (ang. *base bleed*) oraz strumienie syntetyzowane (ang. *synthetic jet*).

Strumienie syntetyzowane są jednym z najbardziej rozwijanych zagadnień w tematyce aktywnego sterowania strumieniami. Znalazły ponadto zastosowanie w wielu dziedzinach techniki oraz nauki np. w chemii, lotnictwie, transporcie, chłodnictwie oraz szeroko pojętym sterowaniu przepływami i warstwą graniczną.

Strumienie syntetyzowane powstają poprzez cykliczne wtłaczanie i wytłaczanie płynu roboczego (najczęściej wody lub powietrza) do zamkniętej komory poprzez dysze (rys. 1). W związku z tym, że uśredniony, masowy strumień przepływu przez dysze jest zerowy, strumienie te nazywa się również strumieniami o zerowym przepływie masy netto (ang. *Zero-Net Mass-Flow, ZNMF*). Jednakże, strumień wytłaczany z komory oddala się od dyszy, a na jego brzegach powstają prądy wirowe, które powodują niezerowy strumień masowy pomimo zerowego natężenia przepływu w dyszy. W taki właśnie sposób strumienie są syntetyzowane.



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)

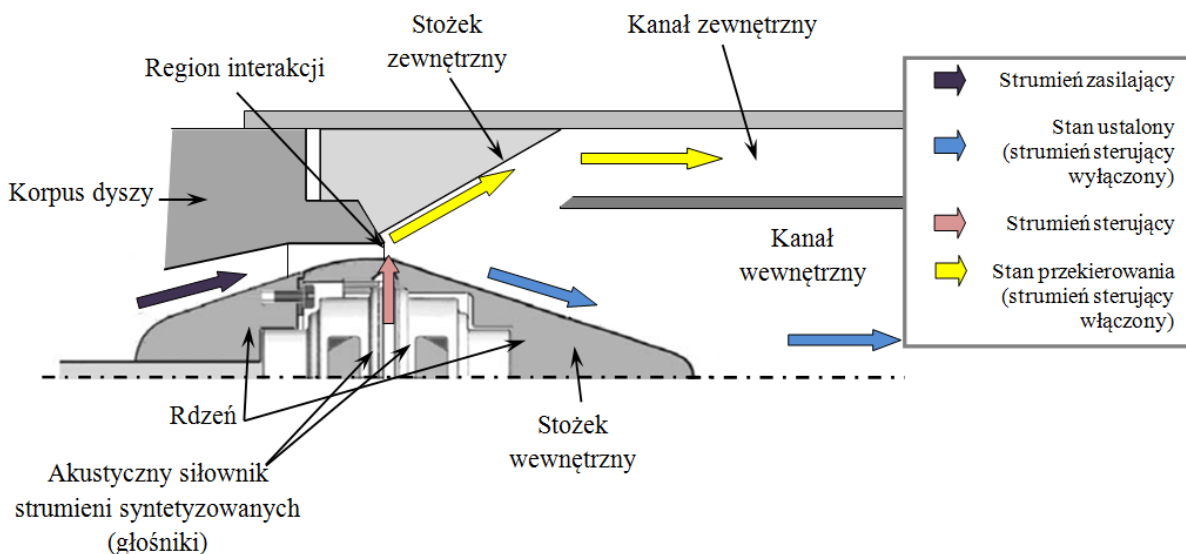
Jak już wspomniano, strumienie syntetyzowane powstają poprzez wtłaczanie i wytłaczanie płynu roboczego do zamkniętej komory. Realizuje się to przez zastąpienie jednej lub wielu ścian komory ruchomym elementem. Urządzenie takie nazywa się siłownikiem lub generatorem strumieni syntetyzowanych (ang. *synthetic jet actuator*). W zależności od elementu wykonawczego rozróżnia się siłowniki:

- piezoelektryczne (element wykonawczy – piezoelektryk);
- akustyczne (element wykonawczy – głośnik);
- mechaniczne (element wykonawczy – tłok);
- i inne.

Najczęściej stosowane są siłowniki akustyczne. Spowodowane jest to niewielkimi kosztami głośników (elementów wykonawczych) oraz ich powszechną dostępnością. Siłowniki akustyczne są ponadto łatwiejsze w zasilaniu od siłowników piezoelektrycznych (np. potrzebują mniejszej częstotliwości prądu do działania) i są łatwiejsze do skonstruowania niż siłowniki mechaniczne.

Strumienie syntetyzowane znalazły zastosowanie między innymi w różnego typu zaworach dwu- oraz trójwymiarowych. Zawory tego typu należą do grupy zaworów płynowych (ang. fluidic valves). Zawory płynowe charakteryzują się brakiem elementów ruchomych lub elementów podlegających deformacji, dzięki czemu są bardzo niezawodne. Ich działanie oparte jest na wykorzystaniu wrażliwości strugi płynu, którego reakcją jest zmiana kierunku przepływu (zmiana wypadkowej strumienia pędu, w rozumieniu wektorowych). Z tego powodu zawory takie przeznaczone są dla przepływów o niewielkim natężeniu. W tym przypadku pojęcie zaworu odnosi się do klasycznych zaworów kierunkowy (np. zawór trójdrogowy), a nie zaworów zamykających.

Zawory trójwymiarowe przyjmują najczęściej formę zaworów osiowoosymetrycznych, w których strumienie syntetyzowane mogą zostać zastosowane w roli strumienia sterującego. Przykładowy zawór osiowoosymetryczny, sterowany z wykorzystaniem dwuelementowego siłownika strumieni syntetyzowanych, przedstawiono na rys. 3. W normalnych warunkach strumień sterujący jest wyłączony, strumień główny wskutek efektu Coandy przylega do stożka wewnętrznego na rdzeniu i płynie wzdłuż osi zaworu w postaci strumienia o znacznej prędkości i małej wartości kołowego pola przekroju poprzecznego (niebieska strzałka). Gdy strumień sterujący zostaje włączony (różowa strzałka), strumień główny, odepchnięty przez strumień sterujący, przylega do stożka zewnętrznego, wypływa w postaci strumienia o pierścieniowym polu przekroju poprzecznego (niebieska strzałka), którego średnica zewnętrzna jest średnicą podstawy stożka zewnętrznego. Strumień ten ma tendencje do tworzenia wiru wyjściowego ponieważ wewnątrz pierścienia tworzy się podciśnienie i strumień się zamyka. Umieszczenie przewodu rurowego o średnicy mniejszej niż średnica wewnętrzna pierścienia, za dyszą powoduje, że nie może dojść do zamknięcia na wyjściu i strumień płynie wzdłuż przewodu (kanał zewnętrzny).



Rys. 2. Zasada działania zaworu osiowoosymetrycznego, na przykładzie wykonanego stanowiska

Zawory opisane w literaturze jako strumień sterujący wykorzystują strumień ciągły. Istnieją przesłanki, że może być on zastąpiony siłownikiem strumieni syntetyzowanych. W analizowanej literaturze zaproponowano już użycie siłownika akustycznego z jednym elementem wykonawczym. Jednakże w takim przypadku znaczna część rdzenia pozostaje niewykorzystana, ponadto wielkość samego głośnika, a więc i prędkość generowanych strumieni syntetyzowanych są ograniczone przez wymiary rdzenia. Przekłada się to bezpośrednio na maksymalne natężenie przepływu strumienia głównego. Korzystniejszym rozwiązaniem wydaje się użycie siłownika piezoelektrycznego (ograniczenie wymiarów), co pozwoli zmniejszyć wymiar zaworu, lub siłownika akustycznego

z dwoma elementami wykonawczymi, co może skutkować zwiększeniem wydajności siłownika – tu wzrostem prędkości (pędu) generowanych strumieni syntetyzowanych. Oczywiście brak odpowiedniej synchronizacji pracy (przesunięcia fazowego) obydwu głośników może doprowadzić do efektu odwrotnego, czyli pogorszenia parametrów siłownika. Jednakże autor nie znalazł publikacji porównujących siłowniki jedno- oraz dwuelementowe. Zastosowanie siłowników mechanicznych jest najmniej korzystne, gdyż są one zdecydowanie większe niż inne rodzaje siłowników.

2. Sformułowanie celu rozprawy

Celem pracy jest udowodnienie możliwości sterowania strumieniem głównym w dyszy osiowosymetrycznej za pomocą strumieni syntetyzowanych oraz dowiedzenie, że zastosowanie siłownika dwuelementowego zamiast jednoelementowego pozwoli na zwiększenie maksymalnego natężenia przepływu strumienia głównego, przy którym sterowanie nim nadal jest możliwe. Realizacja celu podstawowego związana jest z następującymi celami dodatkowymi:

- a) wyznaczeniem charakterystyki stosowanego akustycznego siłownika dwuelementowego, oraz porównaniem z siłownikiem akustycznym jednoelementowym pod względem prędkości generowanych strumieni syntetyzowanych oraz sprawności;
- b) określeniem wpływu (lub jego braku) zamkniętej komory z tyłu membrany na prędkość generowanych przez siłownik strumieni;
- c) wykazaniem możliwości sterowania prędkością strumieni syntetyzowanych poprzez zmianę wartości przesunięcia fazowego prądu zasilającego poszczególne elementy wykonawcze siłownika;
- d) wyznaczeniem stosunku prędkości (strumieni syntetyzowanych oraz strumienia głównego), przy którym następuje przekierowanie strumienia głównego w badanej dyszy;
- e) skonstruowaniem zaworu osiowosymetrycznego wykorzystującego badaną dyszę osiowosymetryczną oraz jego badaniem.

3. Przedstawienie zakresu rozprawy

Pracę podzielono na 6 zasadniczych rozdziałów.

W rozdziale pierwszym przedstawiono ogólny zarys problemu badawczego oraz cel, hipotezę i zakres pracy.

W drugim rozdziale pracy analizie poddano wybrane zagadnienia z zakresu strumieni syntetyzowanych oraz zaworów osiowosymetrycznych oraz omówiono i przedstawiono terminologię odnoszącą się do przedstawianej problematyki. Zaprezentowano ponadto stanowisko badawcze, omówiono zasadę jego działania oraz przedstawiono stosowane wskaźniki przesterowania.

W rozdziale trzecim rozpatrzono metodę badawczą stosowaną w pomiarach. Skupiono się na pomiarze prędkości za pomocą anemometru termicznego oraz pomiarze natężenia przepływu za pomocą rotametu lub przepływomierza termicznego. Przedstawiono ogólny plan badań wraz z podziałem na poszczególne etapy, uwzględniając wykonywane czynności. Dodatkowo wyznaczono podstawowe parametry wejściowe i wyjściowe w czasie wykonywania pomiarów.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań własnych poświęconych analizie dwuelementowych siłowników strumieni syntetyzowanych. Badania podzielono na trzy etapy (podrozdziały). W pierwszych dwóch etapach wykorzystano siłownik stosowany w dyszy osiowosymetrycznej, natomiast w trzecim – badano siłowniki specjalnie zaprojektowane na potrzeby badania. Pierwszy podrozdział poświęcono porównaniu siłowników dwu i jednoelementowych

zasilanych prądem o tej samej stałej mocy czynnej, ze szczególnym uwzględnieniem prędkości generowanych strumieni oraz sprawności siłownika. Podrozdział drugi poświęcono badaniom możliwości sterowania prędkością strumieni syntetyzowanych poprzez zmianę przesunięcia fazowego pomiędzy prądami zasilającymi elementy wykonawcze. Trzeci podrozdział dotyczy natomiast badania wpływu zmiany wybranych cech geometrycznych siłownika na generowane strumienie syntetyzowane. W celu ich zrealizowania zaprojektowano pięć nowych siłowników. Dodatkowo w podrozdziale czwartym podsumowano podstawowe osiągnięcia.

Rozdział piąty poświęcono badaniom dyszy osiowosymetrycznej. W pierwszym podrozdziale zanalizowano osiowosymetryczność dyszy, poprzez pomiar profilu prędkości strumienia głównego wzdłuż dwóch prostopadłych płaszczyzn. W podrozdziale drugim zbadano wpływ strumieni syntetyzowanych na strumień główny, co polegało na pomiarze profilu prędkości. Następnie otrzymane profile dla trzech różnych wartości natężenia przepływu oraz pięciu wartości mocy czynnej zasilania siłownika poddano analizie i wykazano, w jakich przypadkach przesterowanie strumienia głównego jest wystarczające, a w jakich nie. Dla wybranych przypadków wyznaczono współczynniki przesterowania. Następnie wykorzystując badaną dyszę osiowosymetryczną skonstruowano zawór, którego badania omówiono w podrozdziale trzecim. Dla skonstruowanego zaworu zbadano jak procentowo przebiega podział strumienia na część przepływającą przez kanał zewnętrzny i kanał wewnętrzny. Na tej podstawie wykazano, że zawór spełnia skonstruowane w pracy kryterium i dla wybranych parametrów jego funkcjonowania obliczono wskaźniki przesterowania. Dodatkowo w podrozdziale czwartym podsumowano podstawowe osiągnięcia.

Rozdział szósty poświęcono podsumowaniu całej pracy. Skoncentrowano się w szczególności na wykazie osiągnięć przedstawionych w pracy, krytycznej analizie pracy oraz przedstawieniu dalszego kierunku rozwoju badań.

Na końcu pracy zamieszczono wykorzystaną bibliografię, załączniki i jednostronicowe streszczenie pracy.

4. Najważniejsze zagadnienia dotyczące strumieni syntetyzowanych

Jak wspomiano na wstępie, strumienie syntetyzowane powstają poprzez naprzemienne zasysanie i wypychanie płynu roboczego do komory siłownika przez dyszę (rys. 1). W związku z taką budową w czasie opisu siłowników oraz strumieni syntetyzowanych wykorzystuje się szereg parametrów.

Najważniejszymi parametrami opisującymi pracę siłowników strumieni syntetyzowanych są prędkość charakterystyczna strumieni syntetyzowanych U_0 , bezwymiarowy współczynnik wydmuchu L/d (ang. *stroke ratio*) oraz liczba Reynoldsa Re . Sposób wyznaczania obydwu parametrów został bardzo szczegółowo opisany na przykładzie siłownika piezoelektrycznego. Należy podkreślić, że w przypadku wyznaczania współczynnika wydmuchu L/d medium robocze, którym najczęściej jest powietrze, traktowane jest jako nieściśliwe. To założenie pozwala analizować jedynie parametry geometryczne: objętość wytłoczonego powietrza jest równa zmniejszeniu komory roboczej. W przypadku liczby Macha mniejszej niż 0,3 uproszczenie takie jest dopuszczalne, gdyż błąd wynikający z pominięcia ściśliwości powietrza będzie niższy niż 3%.

Najważniejszym wykorzystywanym w pracy parametrem strumieni syntetyzowanych były prędkość charakterystyczna strumieni syntetyzowanych U_0 oraz częstotliwość charakterystyczna siłownika f .

Prędkość charakterystyczną strumieni syntetyzowanych U_0 definiuje się jako:

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

lub jako:

$$U_0 = \frac{1}{S_n T} \int_0^{T_E} \int_{S_n} u(t) \cdot dS \cdot dt \quad (2)$$

gdzie T_E to czas wydmuchu płynu z siłownika (s), S_n to pole dyszy siłownika (m^2), t to czas (s), T to czas jednego cyklu elementu wykonawczego ($T = 1/f$, s), a f to częstotliwość pracy elementów wykonawczych siłownika (Hz) – odpowiadająca co do wartości częstotliwości prądu zasilającego siłownik.

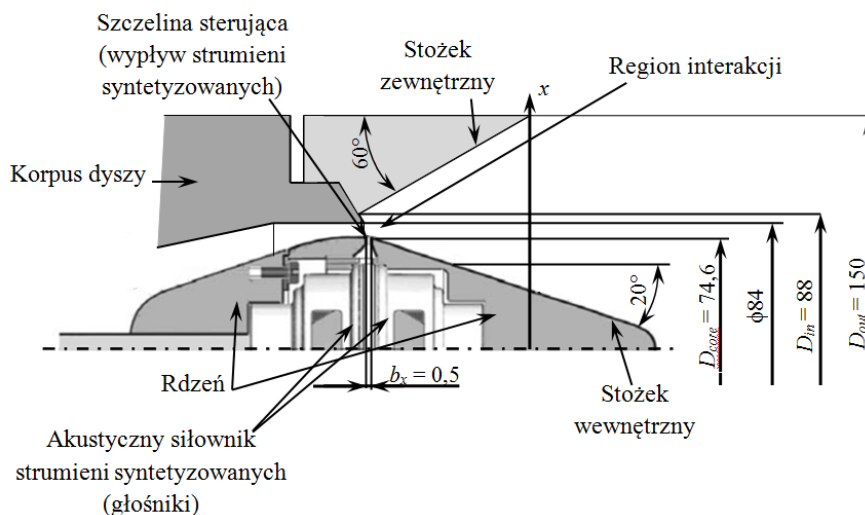
Natomiast częstotliwość rezonansowa siłownika f to częstotliwość prądu zasilającego, przy której wartość prędkości U_0 jest największa (dla tej samej mocy czynnej prądu zasilającego P_{RMS}). Wartość ta jest określana doświadczalnie.

5. Stanowisko badawcze

Na rys. 3 przedstawiono dyszę osiowosymetryczną wraz z zamontowanym stożkiem zewnętrznym. Dysza składa się z korpusu oraz rdzenia, w którym zamontowano siłownik strumieni syntetyzowanych. Siłownik składa się z dwóch głośników (parametry zastosowanych głośników omówiono w części poświęconej badaniom) o średnicy $D_{ls} = 50$ mm umieszczonych naprzeciwlegle w odległości ok. 4 mm i zamocowanych w pierścieniu o średnicy wewnętrznej $D_{rim_in} = D_{ls}$ i średnicy zewnętrznej $D_{rim} = 60$ mm. Na obwodzie pierścienia wykonano 24 otwory o średnicy $d = 3$ mm. Pierścień został zamontowany w rdzeniu dyszy w taki sposób, aby oś pierścienia pokrywała się z osią szczeliny sterującej, przez którą wypływają strumienie sterujące.

Na rys. 3 zaprezentowano dodatkowo najważniejsze elementy dyszy. Jednym z nich jest region interakcji. Jest to miejsce gdzie, następuje zderzenie dwóch strumieni: głównego oraz sterującego (strumieni syntetyzowanych). W tym miejscu na skutek interakcji strumień główny zostaje odepchnięty od stożka wewnętrznego, a następnie wskutek efektu Coandy i oddziaływania strumieni syntetyzowanych przylega do stożka zewnętrznego. Należy zwrócić uwagę na fakt, że średnica minimalna stożka zewnętrznego D_{in} jest większa od średnicy wylotu z dyszy ($D_{in} \neq 84$ mm). Zapobiega to samoczynnemu przyleganiu strumienia głównego do stożka zewnętrznego oraz powoduje powrót strumienia głównego do stanu ustalonego po wyłączeniu strumienia sterującego.

Dokładny rysunek techniczny dyszy osiowosymetrycznej oraz stożka zewnętrznego zawarto w załączniku 1 rozprawy.



Rys. 3. Rysunek poglądowy badanej dyszy wraz z wyróżnieniem najważniejszych elementów oraz wymiarów

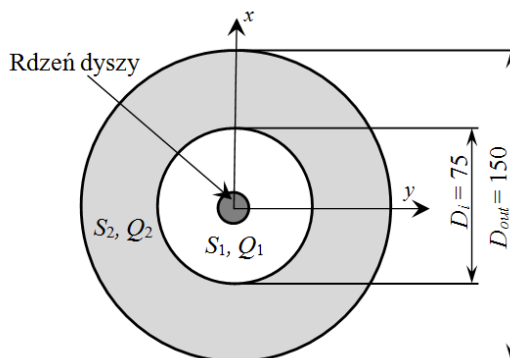
6. Program badań

Podstawowym celem badań, zgodnie z tezą pracy, jest pomiar możliwości sterowania strumieniem głównym w dyszy osiowoosymetrycznej z wykorzystaniem strumienia syntetyzowanego jako strumienia sterującego.

W związku z tym określono niezależne zmienne wejściowe wykorzystywane w trakcie pomiaru strumienia głównego:

- Q_m – objętościowe natężenie strumienia głównego, $m^3 \cdot s^{-1}$;
- f – częstotliwość prądu zasilającego siłownik, Hz;
- P_{RMS} – moc czynna zasilania siłownika, W.

Wielkością wyjściową jest rozkład prędkości strumienia głównego. Nie istnieją szeroko stosowane metody ilościowe pozwalające określić, czy zmiana profilu prędkości strumienia głównego jest wystarczająca. W związku z tym przyjęto, że jeżeli podczas pomiaru wykonanego w osi x (rys 3) strumień objętości przepływający przez powierzchnię pierścieniową S_2 (rys. 4) będzie równy co najmniej 75% całkowitej objętości strumienia głównego ($Q_2 \geq 0,75 \cdot Q_m$), można uznać, że zmiana profilu prędkości jest wystarczająca. W takim przypadku strumienie syntetyzowane mogą być z powodzeniem stosowane do sterowania strumieniem osiowoosymetrycznym w badanej dyszy.



Rys. 4. Reprezentacja graficzna powierzchni pomiarowej wraz z najważniejszymi oznaczeniami

Płaszczyzna pomiarowa zaprezentowana na rys. 4 pokrywa się z osią x uwzględnioną na rys. 3. Oś x zaznaczono na obydwu rysunkach.

W pracy przedstawiono ponadto będą badania siłowników strumieni syntetyzowanych ze szczególnym uwzględnieniem siłowników z dwoma elementami wykonawczymi.

W związku z tym określono niezależne zmienne wejściowe wykorzystywane w trakcie badań siłowników syntetyzowanych:

- f – częstotliwość prądu zasilającego siłownik, Hz;
- P_{RMS} – moc czynna zasilania siłownika, W;
- Q_1 – objętościowe natężenie przepływu w polu pierścieniowym o średnicy zewnętrznej D_i i średnicy wewnętrznej ograniczonej przez rdzeń wewnętrzny;
- Q_2 – objętościowe natężenie przepływu w polu pierścieniowym o średnicy zewnętrznej D_{out} i średnicy wewnętrznej D_i .

Zmienne wyjściowe wykorzystywane w trakcie badań siłowników strumieni syntetyzowanych:

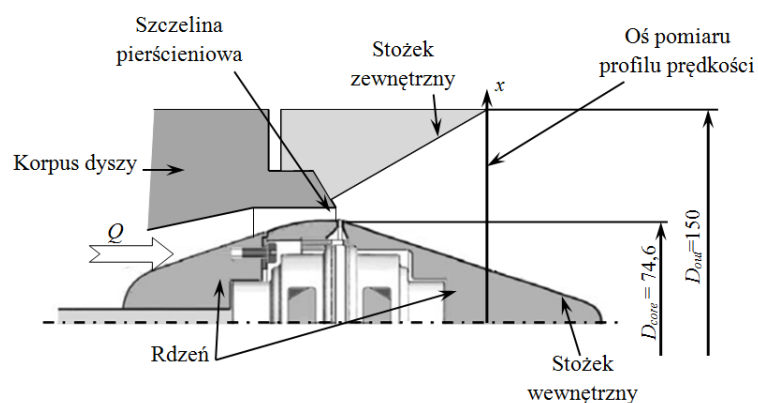
- U_0 – prędkość charakterystyczna generowanych strumieni, $m \cdot s^{-1}$.

Po uwzględnieniu powyższej analizy badania podzielono na dwie zasadnicze części:

- 1) Etap pierwszy to badania akustycznych siłowników strumieni syntetyzowanych z dwoma elementami wykonawczymi. Badania te pozwoliły określić, czy stosowanie siłowników z więcej niż jednym elementem wykonawczym jest uzasadnione. Celem tych badań było ponadto dostarczenie informacji na temat dwuelementowych siłowników strumieni syntetyzowanych, które miały umożliwić zaprojektowanie nowego siłownika strumieni syntetyzowanych możliwego do zastosowania w dyszach osiowosymetrycznych (część nieujęta w autoreferacie).
- 2) Etap drugi eksperymentu to badania strumienia głównego, a w szczególności – jego osiowosymetryczności, oraz badanie wpływu strumieni syntetyzowanych na strumień główny (część ujęta w autoreferacie).

7. Dysza osiowosymetryczna – weryfikacja hipotezy rozprawy

Głównym celem badań jest wykazanie, że istnieje możliwość przesterowania strumienia głównego w dyszy osiowosymetrycznej za pomocą strumienia sterującego, dlatego w tej części pracy analizie poddano wpływ strumieni syntetyzowanych na strumień główny. Na rys. 5 przedstawiono dyszę osiowosymetryczną wraz z zaznaczoną osią pomiarową i strumieniem dolotowym.



Rys.5. Rysunek poglądowy badanej dyszy z zaznaczoną osią x pomiaru profilu prędkości strumienia głównego

Na podstawie wcześniejszych przeprowadzonych badań dobrano trzy wartości objętościowego natężenia przepływu strumienia głównego Q :

- $Q_{01} = 0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- $Q_{02} = 0,0025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- $Q_{03} = 0,0018 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

oraz pięć wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych ($P_0 = 0 \text{ W}$, $P_1 = 0,5 \text{ W}$, $P_2 = 1 \text{ W}$, $P_3 = 2 \text{ W}$, $P_4 = 3 \text{ W}$), dla których przebadano wpływ strumieni syntetyzowanych na strumień główny. Należy zaznaczyć, że jako moc czynną $P_0 = 0 \text{ W}$ rozumie się sytuację, w której siłownik strumieni syntetyzowanych jest wyłączony, a strumień główny znajduje się w stanie ustalonym i przepływa wzdłuż ściany stożka wewnętrznego.

Pomiary profilu prędkości strumienia głównego odbywały się wzdłuż osi x (rys. 5) co 2 mm. Jest to minimalny krok przesuwu dla dostępnego układu trawersującego, który można sprząść z programem obsługującym wykorzystywaną sondę anemometru termicznego (ang. HWA).

Pomiar natężenia przepływu w dyszy odbywał się na wlocie z wykorzystaniem rotametrów. Siłownik strumieni syntetyzowanych zasilany był prądem o częstotliwości f równej co do wartości częstotliwości naturalnej $f_n = 147 \text{ Hz}$ siłownika (patrz rozdział **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania., Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** rozprawy).

Należy zaznaczyć, że pomiar profilu prędkości został zmierzony jedynie dla osi x . Na podstawie badania osiowosymetryczności układu przyjęto uproszczenie, że pomiar profilu prędkości w osi x dostarcza informacji o rozkładzie prędkości w całej płaszczyźnie. W analizach pominięto problem asymetrii strumienia głównego.

Wyniki i ich analiza

Zdefiniowano strumienie syntetyzowane mogą być wykorzystane do sterowania przepływem w dyszy osiowosymetrycznej jeżeli, co najmniej 75% objętościowego natężenia przepływu przepływa przez pole w kształcie pierścienia o średnicy wewnętrznej $D_i = 75 \text{ mm}$ i średnicy zewnętrznej $D_{out} = 150 \text{ mm}$ (rys 4).

Na podstawie przyjętego warunku oraz metody pomiarowej (przy założeniu osiowosymetryczności przepływu) przyjęto, że strumień główny można uznać za przesterowany, jeżeli:

$$\frac{Q_1}{Q_2} \leq \frac{0,25}{0,75} = \frac{1}{3} \quad (3)$$

gdzie:

$$Q_1 = \int_{18}^{35,5} 2\pi x \cdot u \, dx \quad (4)$$

$$Q_2 = \int_{35,5}^{75} 2\pi x \cdot u \, dx \quad (5)$$

Na tej podstawie wyznaczono stosunki objętościowych natężeń przepływu Q_1/Q_2 przedstawione w tabeli 1. Należy zauważyć, że w wielu przypadkach wartość objętościowego natężenia przepływu Q_1+Q_2 nie jest równa co do wartości zadanemu objętościowemu natężeniu przepływu Q strumienia głównego. Jest to spowodowane wzrostem turbulencji przepływu, które wzbudzone są przez strumień sterujący. Należy pamiętać, że strumienie syntetyzowane, pełniące funkcję strumieni sterujących, nie wprowadzają do układu dodatkowej objętości medium roboczego

(powietrza), a jedynie zwiększają jego energię. W związku z tym dokładny pomiar objętościowego natężenia przepływu Q_1+Q_2 wypływającego z dyszy musiałby odbyć się z zastosowaniem innej metody pomiarowej niż jednodrutowy anemometr HWA, np. poprzez zastosowanie trzydrutowego anemometru, co pozwoliło pozwoliłoby na uwzględnienie kierunku wektora prędkości w obliczeniach, albo poprzez wbudowanie dyszy w zawór i pomiar wartości objętościowych natężeń przepływu na wyjściu zaworu. Jednak w celu uproszczenia przeprowadzanej analizy aspekt ten jest na tym etapie pomijany.

Tabela 1. Stosunek objętościowych natężeń przepływu Q_1/Q_2

Q_1/Q_2	$Q_{01} = 0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{02} = 0,0025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{03} = 0,0018 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$P_0 = 0 \text{ W}$	1,61	1,30	0,80
$P_1 = 0,5 \text{ W}$	1,23	0,15	0,16
$P_2 = 1 \text{ W}$	1,15	0,15	0,14
$P_3 = 2 \text{ W}$	1,00	0,18	0,20
$P_4 = 3 \text{ W}$	0,16	0,20	0,20

Należy nadmienić, że prędkość strumienia głównego mieści się w zakresie $u = 0,07 \div 1,32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla Q_{01} , $u = 0,07 \div 0,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla Q_{02} oraz $u = 0,07 \div 0,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla Q_{03} . Są to wartości bardzo małe, dla których błąd pomiaru za pomocą anemometru HWA jest wysoki. W związku z tym należy założyć, że obliczone wartości Q_1 oraz Q_2 odwzorowują jedynie pewne „trendy” zachowania się strumienia, a nie dokładne dane liczbowe.

Jednakże, mimo to analiza tabeli 1 wykazuje, że najlepsze przesterowanie strumienia otrzymano przy mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika:

- $P_4 = 3 \text{ W}$ dla $Q_{01} = 0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $Q_1/Q_2 = 0,16$;
- $P_1 = 0,5 \text{ W}$ dla $Q_{02} = 0,0025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $Q_1/Q_2 = 0,15$;
- $P_2 = 1 \text{ W}$ dla $Q_{03} = 0,0018 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $Q_1/Q_2 = 0,14$.

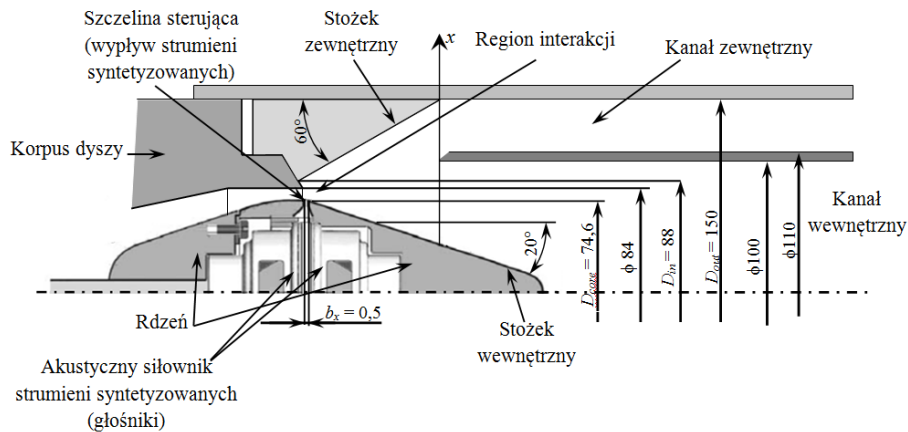
Należy zauważyć, że w przypadku wartości objętościowego natężenia przepływu Q_{02} strumienia głównego wartość stosunku $Q_1/Q_2 = 0,15$ zarówno dla mocy czynnej siłownika P_1 jak i P_2 . Wynika to z błędu zaokrąglenia wartości Q_1/Q_2 do drugiego miejsca po przecinku. Wartości te zaokrąglone do czwartego miejsca po przecinku wynoszą $Q_1/Q_2 = 0,1483$ dla $P_1 = 0,5 \text{ W}$ oraz $Q_1/Q_2 = 0,1509$ dla $P_2 = 1 \text{ W}$. W związku z tym jako najbardziej korzystne w tym przypadku rozwiązanie przyjęto moc czynną zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych $P_1 = 0,5 \text{ W}$.

Na podstawie powyższych wyników można jednoznacznie potwierdzić postawioną w pracy hipotezę.

8. Zawór osiowosymetryczny

Kolejnym etapem badań było skonstruowanie zaworu osiowosymetrycznego w oparciu o badaną dyszę. W tym celu na wylocie dyszy umiejscowiono dwie rury, w taki sposób, aby utworzyć dwa kanały o wymiarach(rys. 5):

- kanał zewnętrzny – średnica zewnętrzna $\phi 150$, średnica wewnętrzna $\phi 110$, długość kanału 500 mm;
- kanał wewnętrzny $\phi 100$ o długości 600 mm.



Rys.6. Rysunek zaworu osiowo-symetrycznego wykorzystujący badaną dyszę osiowo-symetryczną

W tym celu wykorzystano rurę wykonaną z PCV-U według normy PN EN 1401-1(rura zewnętrzna) oraz rurę wykonaną z PP według normy PN-EN 1451(rura wewnętrzna).

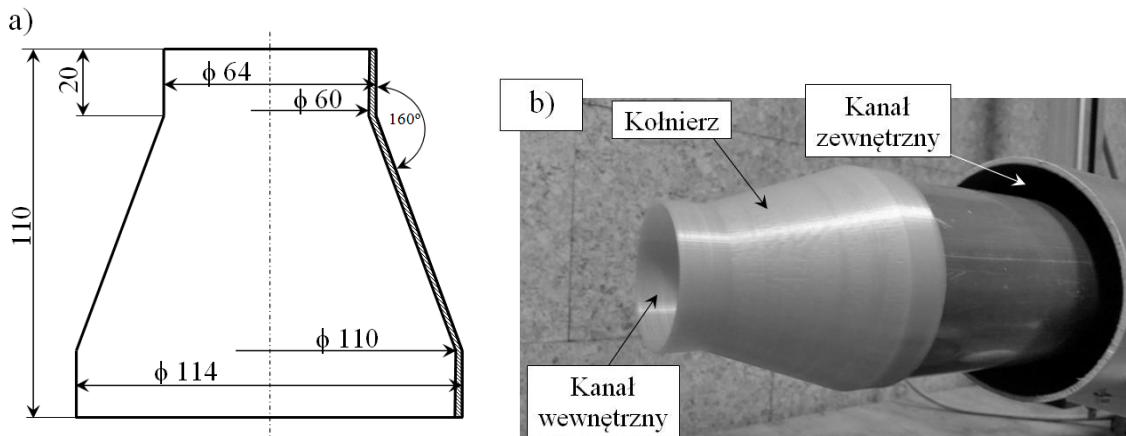
Należy zauważyć, że wymiary kanałów zewnętrznego i wewnętrznego różnią się od założeń przyjętych w pracy. Jednakże na podstawie przeprowadzonych badań, opisanych w poprzednim rozdziale, przyjęto że taki wymiar kanałów będzie wystarczający do przeprowadzenia badania funkcjonowania zaworu osiowo-symetrycznego.

Przesterowanie strumienia głównego uznaje się za wystarczającej w przypadku, gdy po załączeniu strumienia sterującego co najmniej 75% objętości strumienia przepływie przez kanał zewnętrzny.

Pomiar prędkości średniej w kanałach odbywał się poprzez zmierzenie natężenia przepływu oraz prędkości średniej na wylocie kanału wewnętrznego z wykorzystaniem anemometru wiatrakowego. Należy zauważyć, że w związku z uzyskiwanymi na wylocie kanałów prędkościami oraz ich rozkładem pomiar za pomocą anemometru HWA generowałyby większe błędy niż wykorzystywany anemometr wiatrakowy.

W celu zmniejszenia niedokładności pomiaru związanego z odchyleniem osi pomiarowej sondy anemometru wiatrakowego od osi przepływu na końcu kanału wewnętrznego zamontowano kołnierz pomiarowy zaprezentowany na rys. 6rys.. Pomiar prędkości średniej odbywał się na wylocie przedstawionego kołnierza.

Pomiary przeprowadzono dla trzech wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych $P_0 = 0 \text{ W}$, $P_3 = 2 \text{ W}$, $P_4 = 3 \text{ W}$.



Rys.6. Rysunek kołnierza pomiarowego (a), zdjęcie zamontowanego na kanale wewnętrznym kołnierza (b)

Wyniki eksperymentu

W tabelach 2 oraz 3 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} . Pomiary przeprowadzono dla wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych $P_0 = 0$ W oraz $P_3 = 2$ W (tabela 2) i $P_4 = 3$ W (tabela 3).

Należy zauważyć, że wartości natężenia przepływu strumienia głównego Q oraz natężenia przepływu strumienia w kanale wewnętrznym Q_{in} dla mocy czynnej $P_0 = 0$ W częściowo się pokrywają.

Tabela 2. Wartości natężenia przepływu w kanale wewnętrznym Q_{in} i zewnętrznym Q_{out} dla różnych wartości natężeń przepływu strumienia głównego i wartości mocy czynnej zasilania siłownika $P_0 = 0$ W oraz $P_3 = 2$ W

$Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$P_0 = 0 \text{ W}$			$P_3 = 2 \text{ W}$		
	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
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 3. Wartości natężenia przepływu w kanale wewnętrznym Q_{in} i zewnętrznym Q_{out} dla różnych wartości natężeń przepływu strumienia głównego i wartości mocy czynnej zasilania siłownika $P_0 = 0$ W oraz $P_4 = 3$ W

$Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$P_0 = 0 \text{ W}$			$P_4 = 3 \text{ W}$		
	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{u}_{in}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{out}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
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

Analiza badań

W tabeli 4 przedstawiono w procentach, 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 wyłączonoego siłownika strumieni syntetyzowanych cała objętość strumienia głównego przepływała przez kanał wewnętrzny. Generalnie 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. Zasadniczo im wyższa prędkość strumienia opływającego dane ciało, tym intensywniejszy jest efekt „przyklejania” się strumienia do powierzchni opływającego ciała, co zgadza się z 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 $P_3 = 2$ W. 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 różnić się od przedstawionej w tabeli 5.6. W związku z tym 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 $P_4 = 3 \text{ W}$ 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 4. Wartość strumienia objętości Q_{in} przepływającego przez kanał wewnętrzny w stosunku do całkowitego strumienia objętości Q strumienia głównego dla różnych wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych

$Q, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{in}/Q \cdot 100\%$		
	0 W	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	-

9. Ocena własna i przesłanki do dalszych badań

Ocena wkładu do rozwoju wiedzy na temat strumieni syntetyzowanych i aktywnego sterowania strumieniem

Zdaniem autora na szczególną uwagę pod względem rozwoju wiedzy z zakresu aktywnego sterowania zasługują badania dwuelementowych siłowników strumieni syntetyzowanych. W pracy wykazano, że siłowniki dwuelementowe charakteryzują się wyższymi parametrami generowanych strumieni niż siłowniki jednoelementowe podczas zasilania prądem o tym samym przebiegu i mocy. Wydaje się to szczególnie ważne, ponieważ w znalezionej literaturze przedmiotu dotyczącej siłowników dwuelementowych nie doszukano się informacji na temat powodów zdecydowania się na wykorzystanie takich siłowników.

Przeanalizowano wpływ zmiany wartości dwóch parametrów geometrycznych siłownika na generowane przez siłownik strumienie i jego sprawność. Wykazano, że w trakcie projektowania siłowników dwuelementowych można wykorzystać współczynnik CR , jednakże brakuje modeli matematycznych określających częstotliwość naturalną akustycznych siłowników dwuelementowych.

Nowością w aspekcie badania dyszy osiowosymetrycznych jest wykazanie, że jako strumienie sterujące można wykorzystać strumienie syntetyzowane. Takie rozwiązanie jest bardziej korzystne pod względem niezawodności i finansów. Strumienie ciągle wymagają dodatkowych urządzeń, takich jak pompy odśrodkowe lub kompresory, które nie są wykorzystywane w siłownikach strumieni syntetyzowanych potrzebujących co prawda specjalnego układu zmieniającego częstotliwość prądu zasilającego, ale niewielkich mocy.

W pracy przedstawiono ponadto pierwszy (według wiedzy autora) zawór osiowosymetryczny wykorzystujący, jako strumienie sterujące, strumienie syntetyzowane. Należy nadmienić, że mimo, iż istnieje patent opisujący taki zawór, autorowi tej pracy nie udało się dotrzeć do żadnych publikacji dotyczących zawór tego typu. Należy więc zauważyć, że jest to prototyp mogący stanowić bazę do dalszego rozwoju tego urządzenia.

Perspektywy kontynuacji badań

Zagadnienia siłowników strumieni syntetyzowanych są podejmowaną przez badaczy, na całym świecie. Jest to dziedzina ciągle rozwijająca się. Wśród zagadnień poruszonych w pracy zauważono szereg możliwości rozwoju. W szczególności w tematyce dwu- i więcej niż dwuelementowych siłowników strumieni syntetyzowanych, między innymi:

- analityczne opracowanie i walidacja modelu matematycznego wieloelementowego (w tym dwu) siłownika strumieni syntetyzowanych;
- badania eksperymentalne wieloelementowych siłowników strumieni syntetyzowanych i wyznaczenie zależności pomiędzy liczbą elementów wykonawczych, a poszczególnymi parametrami.

Zawory osiowosymetryczne są dziś mało rozwijanym zagadnieniem, a przedstawione w pracy badania potwierdziły ograniczone ich stosowanie (przy stosowaniu strumieni syntetyzowanych), związane z małymi natężeniami przepływu strumienia głównego. Jednakże poczynione badania siłowników strumieni syntetyzowanych i dyszy osiowosymetrycznej są wystarczające, aby podjąć próby minimalizacji dyszy i zastosowania jej w technikach mikrostrumieniowych.

Techniki takie wykorzystują bardzo niewielki przepływy, a zastąpienie głośników piezoelektrykami pozwoliłoby na znaczne ograniczenie rozmiarów rdzenia dyszy oraz jej korpusu. Zdaniem autora to właśnie w technikach mikrostrumieniowych należałoby szukać zastosowania badanej dyszy i zaworu.

W opinii autora przedstawione w pracy badania mogą być wprost wykorzystane do zaprojektowania dyszy wykorzystującej siłowniki piezoelektryczne na potrzeby techniki mikrostrumieniowej.

Wśród badań dyszy i zaworu osiowosymetrycznego, które należałoby wykonać w celu usprawnienia zaworu, należy wymienić:

- określenie wpływu kąta stożka zewnętrznego na funkcjonowanie zaworu;
- określenie wpływu kąta stożka wewnętrznego na funkcjonowanie zaworu;
- określenie wpływu uskoku i odległości pomiędzy korpusem dyszy a stożkiem zewnętrznym na funkcjonowanie zaworu;

badanie wpływu chropowatości (w szczególności stożka wewnętrznego) na współczynniki sterowania.



Rys. 7. Zdjęcie skonstruowanego zaworu (po lewej) oraz prototyp wydrukowanej dyszy osiowosymetrycznej z siłownikiem piezoelektrycznym (po prawej)