

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
w Bydgoszczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej

mgr inż. Emil Smyk

**STEROWANIE STRUMIENIEM
OSIOWOSYMETRYCZNYM ZA POMOCĄ
STRUMIENIA SYNTETYZOWANEGO**

PROMOTOR

dr hab. inż. Kazimierz Peszyński prof. nadzw. UTP

*Praca została zrealizowana dzięki finansowaniu ze
środków budżetowych na naukę w latach 2015/2018 jako
projekt badawczy w ramach programu pod nazwą
„Diamentowy Grant”.*

Bydgoszcz, 2018

Składam serdeczne podziękowania Promotorowi dr. hab. inż. Kazimierzowi Peszyńskiemu za inspirację do podjęcia tematu rozprawy. Szczególnie dziękuję mojej żonie Asi i dzieciom (Antoninie i Erykowi) za cierpliwość, wiarę oraz wsparcie w chwilach zwątpienia.

SPIS TREŚCI

Wykaz najważniejszych oznaczeń i skrótów	6
1. Wstęp.....	8
1.1 Wprowadzenie do tematyki pracy	8
1.2 Hipoteza rozprawy.....	12
1.3 Cel rozprawy	12
1.4 Zakres rozprawy	12
2. Wybrane zagadnienia z zakresu strumieni syntetyzowanych oraz zaworów osiowosymetrycznych.....	15
2.1 Wybrane zagadnienia z zakresu strumieni syntetyzowanych.....	15
2.1.1 Prędkość charakterystyczna	16
2.1.2 Współczynnik wydmuchu i liczba Reynoldsa.....	17
2.1.3 Częstotliwość rezonansowa.....	18
2.1.4 Inne parametry strumieni syntetyzowanych.....	22
2.1.5 Nietradycyjne siłowniki strumieni syntetyzowanych.....	23
2.2 Zawory i dysze osiowosymetryczne.....	25
2.2.1 Dysza osiowosymetryczna – stanowisko badawcze	26
2.2.2 Wskaźniki przesterowania.....	27
3. Metoda badawcza.....	29
3.1 Pomiar prędkości powietrza	29
3.1.1 Anemometr ciepłodrutowy.....	29
3.1.2 Anemometr wiatrakowy	32
3.2 Pomiar natężenia przepływu.....	32
3.3 Plan badań – weryfikacja hipotezy	33
3.3.1 Etap pierwszy	34
3.3.2 Etap drugi	35
4. Strumienie sterujące – strumienie syntetyzowane.....	36
4.1 Siłownik z jednym oraz dwoma elementami wykonawczymi.....	39
4.1.1 Wpływ komory na pracę siłownika.....	39
4.1.2 Wyniki eksperymentu	42
4.1.3 Analiza badań.....	46
4.1.4 Podsumowanie	48

4.2	Charakterystyka siłownika a przesunięcie fazowe	49
4.2.1	Wyniki eksperymentu	50
4.2.2	Analiza badań.....	52
4.2.3	Podsumowanie	53
4.3	Parametry akustycznych siłowników strumieni syntetyzowanych z dwoma elementami wykonawczymi	53
4.3.1	Wyniki eksperymentu	56
4.3.2	Analiza badań.....	61
4.3.3	Podsumowanie	66
4.4	Wnioski dotyczące rozdziału.....	67
5.	Strumień osiowosymetryczny	70
5.1	Strumień główny	70
5.2	Sterowanie strumieniem głównym	72
5.2.1	Wyniki eksperymentu	72
5.2.2	Analiza badań.....	74
5.2.3	Podsumowanie	77
5.3	Zawór osiowosymetryczny.....	78
5.3.1	Wyniki eksperymentu	80
5.3.2	Analiza badań.....	80
5.3.3	Podsumowanie	82
5.4	Wnioski dotyczące rozdziału.....	82
6.	Podsumowanie pracy.....	84
6.1	Podsumowanie głównej części rozprawy	84
6.2	Ograniczenia i krytyczna refleksja	85
6.3	Ocena wkładu do rozwoju wiedzy na temat strumieni syntetyzowanych i aktywnego sterowania strumieniem.....	86
6.4	Perspektywy kontynuacji badań	87
	Bibliografia.....	89
	Załącznik 1. Dysza osiowosymetryczna.....	96
	Załącznik 2. Przykładowa tablica kalibracyjna sondy 55P16 stosowana w programie StreamWare Basics	106
	Załącznik 3. Program do obliczeń prędkości charakterystycznej U_0	109
	Załącznik 4. Tabele obliczonych wartości natężeń przepływu	113
	Streszczenie.....	114

Summary 115

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

B	–	współczynnik tłumienia, s^{-1} ;
c_U	–	stosunek prędkości;
c_Q	–	stosunek natężeń przepływu;
CR	–	współczynnik sprzężenia;
d	–	średnica dyszy, chyba że zdefiniowano inaczej, m;
D	–	średnica membrany, chyba że zdefiniowano inaczej, m;
E	–	energia kinetyczna, J;
f	–	częstotliwość, Hz;
f_H	–	częstotliwość Helmholtza, Hz;
f_n	–	częstotliwość drgań własnych membrany, Hz;
H	–	wysokość, m;
K	–	współczynnik sprężystości, $N \cdot m^{-1}$;
L	–	długość, m;
L_e	–	wydłużona długość dyszy, m;
m	–	masa, kg;
M_0	–	strumień pędu, $N \cdot m^{-2}$;
Ma	–	liczba Macha;
n	–	liczba próbek sygnału;
p	–	ciśnienie, Pa;
P	–	moc, W;
P_{RMS}	–	moc czynna, W;
Q	–	objętościowe natężenie przepływu, $m^3 \cdot s^{-1}$;
Re	–	liczba Reynoldsa;
S	–	pole powierzchni, m^2 ;
St	–	liczba Stokesa;
Sr	–	liczba Struhala;
t	–	czas, s;
T	–	okres, s;
T_e	–	okres wydmuchu strumieni syntetyzowanych, s;
u	–	prędkość, $m \cdot s^{-1}$;
U_0	–	prędkość charakterystyczna strumieni syntetyzowanych, $m \cdot s^{-1}$;
V	–	objętość, m^3 .

Symbole greckie

η	–	sprawność, %;
κ	–	współczynnik adiabaty;
μ	–	lepkość dynamiczna, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$;
ν	–	lepkość kinematyczna, $m^2 \cdot s^{-1}$;

ω – prędkość kątowna, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;
 ρ – gęstość, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Indeksy dolne

c – odnosi się do komory siłownika strumieni
syntetyzowanych;
 d – odnosi się do membrany;
 n – odnosi się do dyszy siłownika strumieni
syntetyzowanych.

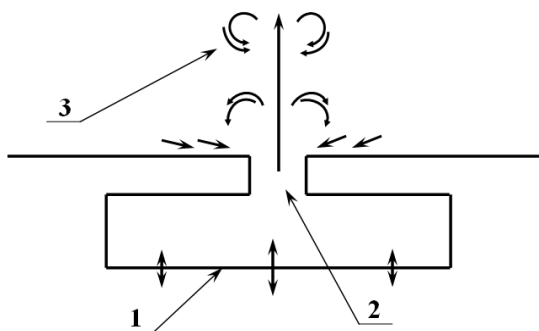
1. WSTĘP

1.1 Wprowadzenie do tematyki pracy

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 [1, 2], gazogeneratory (ang. *base bleed*) oraz strumienie syntetyzowane [3–6] (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 [7], lotnictwie [8, 9], transporcie [10–12], chłodnictwie [13–16] oraz szeroko pojętym sterowaniu przepływami i warstwą graniczną [17–21].

Strumienie syntetyzowane powstają poprzez cykliczne wtłaczanie i wytłaczanie płynu roboczego (najczęściej wody lub powietrza) do zamkniętej komory [22] poprzez dysze (rys. 1.1). 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. 1.1. Siłownik strumieni syntetyzowanych: 1 – ruchoma membrana, 2 – dysza siłownika, 3 – strumienie syntetyzowane

W języku angielskim strumienie te noszą nazwę *synthetic jet* – w bezpośrednim tłumaczeniu „strumienie syntetyczne”. Angielskie słowo *synthetic* oznacza nie tylko przedmioty uzyskane w sposób sztuczny, ale również coś odnoszącego się do syntezy, obejmującego syntezę lub tworzonego przez nią [92] np. synteza dźwięku. Jednakże w języku polskim słowo syntetyczny oznacza [93]:

- 1) łączący w jedną całość lub obejmujący całość z pominięciem szczegółów;
- 2) będący jednolitą całością złożoną z różnych elementów;
- 3) otrzymywany sztucznie w wyniku syntezy chemicznej.

Z powodu tej wieloznaczności autor zdecydował się na wykorzystanie nazwy strumienie/strugi syntetyzowane [23] (również w języku czeskim do określenia tego zjawiska używa się słowa *syntetizovaný* [24, 25] zamiast *syntetický*), aby zapobiec mylnej interpretacji genezy omawianego zjawiska. Jednakże w szeregu publikacji wykorzystuje się pojęcie strugi syntetycznej [26–29].

Jak już wspomniano, strumienie syntetyzowane powstają poprzez wtłaczanie i wytlaczanie płynu roboczego do zamkniętej komory. Realizuje się to przez zastąpienie jednej lub wielu ścian komory ruchomym elementem. Urządzenie takie nazywa się siłownikiem [30] lub generatorem [28] strumieni syntetyzowanych (ang. *synthetic jet actuator*). W zależności od elementu wykonawczego rozróżnia się siłowniki [31]:

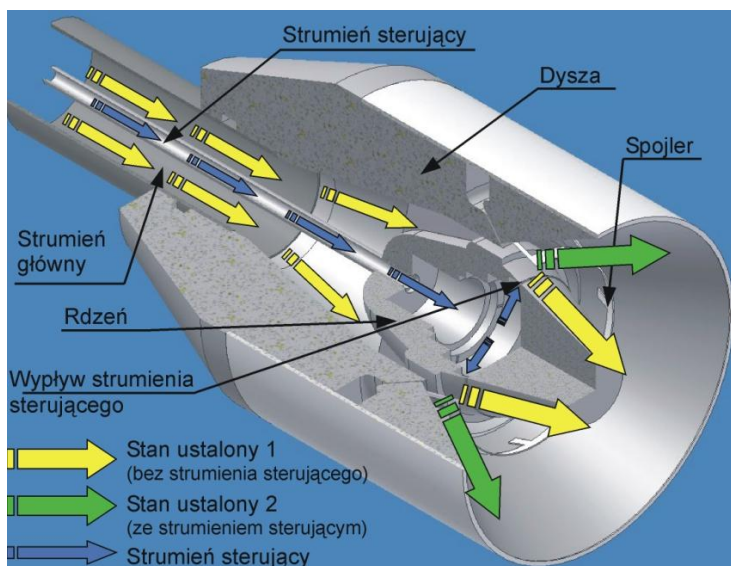
- piezoelektryczne (element wykonawczy – piezoelektryk) [32–37];
- akustyczne (element wykonawczy – głośnik) [38–41];
- mechaniczne (element wykonawczy – tłok) [42];
- i inne.

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- [43] oraz trójwymiarowych [44, 45]. Zawory tego typu należą do grupy zaworów płynowych (ang. *fluidic valves*) [45]. 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 [46].

W tej pracy pojęcie zaworu odnosi się do klasyczny zaworów kierunkowy (np. zawór trójdrogowy), a nie zaworów zamykających.



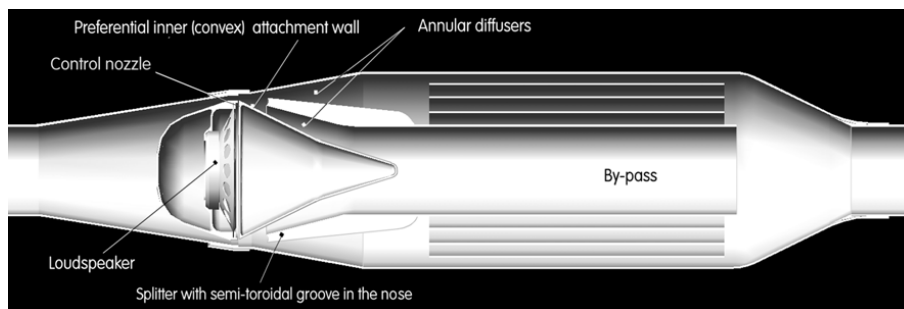
Rys. 1.2. Schemat dyszy osiowosymetrycznej z rdzeniem wewnętrznym [47]

Zawory trójwymiarowe przyjmują najczęściej formę zaworów osiowosymetrycznych, w których strumienie syntetyzowane mogą zostać zastosowane w roli strumienia sterującego. Przykładowy zawór osiowosymetryczny przedstawiono na rys. 1.2 (należy zaznaczyć, że ww. zawór nie jest zaworem sterowanym za pomocą strumieni syntetyzowanych). 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. Gdy strumień sterujący zostaje włączony, strumień główny, odepchnięty przez strumień sterujący, przylega do stożka zewnętrznego, wypływa w postaci strumienia o pierścieniowym polu przekroju poprzecznego, 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. Tą zasadę dobrze ilustruje rys. 1.3. W przypadku zaworu osiowosymetrycznego sterowanego strumieniami syntetyzowanymi w rdzeniu zabudowuje się

generator strumieni syntetyzowanych, a strumień sterujący (strumienie syntetyzowane) oddziałuje na strumień główny, wypływając przez szczelinę pierścieniową umiejscowioną na obwodzie rdzenia (szczelina widoczna również na rys. 1.2 jako „Wypływ strumienia sterującego”).

Zawór osiowosymetryczny sterowany strumieniami syntetyzowanymi po raz pierwszy opisano, według wiedzy autora, w patencie [48]. Schemat budowy tego zaworu przedstawiono na rys. 1.3. Zgodnie z powyższym opisem działania zaworów osiowosymetrycznych w czasie gdy siłownik strumieni syntetyzowanych jest wyłączony, strumień główny płynie przez by-pass (rys. 1.3), natomiast gdy siłownik strumieni syntetyzowanych jest włączony strumień główny przepływa przez rurę pierścieniową.

Na tej podstawie można przypuszczać, że strumienie syntetyzowane mogą zastąpić klasyczny strumień sterujący. Jednakże rozmiary rdzenia dyszy, a więc i samego zaworu, ograniczają zakres możliwych do zastosowania siłowników strumieni syntetyzowanych. W [48] zaproponowano 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, więc jest to jedynie przypuszczenie. Zastosowanie siłowników mechanicznych jest najmniej korzystne, gdyż są one zdecydowanie większe niż inne rodzaje siłowników.



Rys. 1.3. Osiowosymetryczny zawór sterowany strumieniami syntetyzowanymi [48]

1.2 Hipoteza rozprawy

Podstawową hipotezą badawczą w ramach przedstawionego we wstępie tematu jest przypuszczenie: **istnieje możliwość sterowania strumieniem głównym w dyszy osiowosymetrycznej za pomocą strumieni syntetyzowanych.**

1.3 Cel 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.

1.4 Zakres rozprawy

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.

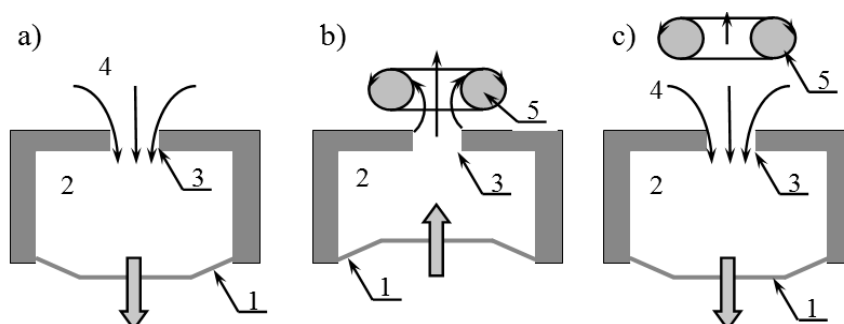
Rozdział szósty poświęcono podsumowaniu całej pracy. Skoncentrowano się w szczególności na wykazie osiągnięć przedstawionych w pracy, krytycznej analizie pracy oraz przedstawieniu dalszego kierunku rozwoju badań.

Na końcu pracy zamieszczono wykorzystaną bibliografię oraz załączniki.

2. WYBRANE ZAGADNIENIA Z ZAKRESU STRUMIENI SYNTETYZOWANYCH ORAZ ZAWORÓW OSIOWOSYMETRYCZNYCH

2.1 Wybrane zagadnienia z zakresu strumieni syntetyzowanych

Jak wspomiano na wstępie, strumienie syntetyzowane powstają poprzez naprzemienne zasysanie i wypychanie płynu roboczego do komory siłownika przez dyszę (rys. 2.1). W związku z taką budową w czasie opisu siłowników oraz strumieni syntetyzowanych wykorzystuje się szereg parametrów.



Rys. 2.1. 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)

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 [11, 49-51]. Sposób wyznaczania obydwu parametrów został bardzo szczegółowo opisany w [52] na przykładzie siłownika piezoelektrycznego. Należy podkreślić, że w przypadku wyznaczania współczynnika wydmuchu L/d medium robocze, którym najczęściej jest powietrze, traktowane jest jako nieściśliwe [31]. 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% [53].

2.1.1 Prędkość charakterystyczna

Jak wspomniano strumienie syntetyzowane powstają poprzez cykliczne wytłaczanie i wtłaczanie medium roboczego do komory siłownika. Strumienie te mają postać struktur wirowych powstających na brzegu wypływającego przez dysze strumienia. W związku z tym wymagają innego podejścia niż strumienie ciągłe. Jednym z ich podstawowych parametrów jest ich prędkość, która może być przedstawiona jako [24]:

$$u(t) = \bar{u} + u_p \left(\frac{t}{T} \right) + \tilde{u} \left(\frac{t}{T} \right) \quad (2.1)$$

gdzie:

$u(t)$ – prędkość chwilowa w dyszy siłownika, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

\bar{u} – uśredniony w czasie składnik prędkości, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

u_p – okresowy składnik prędkości, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

\tilde{u} – losowy składnik prędkości, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

t – czas, s;

T – czas jednego cyklu elementu wykonawczego, $T = 1/f$, s.

Metodę pomiaru okresowej, średniej składowej prędkości $\bar{U} \left(\frac{t}{T} \right) = \bar{u} + u_p \left(\frac{t}{T} \right)$ oraz składowej losowej $U_{rms} = \tilde{u} \left(\frac{t}{T} \right)$ omówiono w podrozdziale 3.1– wzory (3.3) oraz (3.4).

Jednakże takie definiowanie prędkości strumieni syntetyzowanych jest problematyczne i nie może być uproszczone do jednej wartości charakterystycznej. W związku z tym prędkość charakterystyczną definiuje się jako [40, 43, 44]:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T_E} u(t) dt \quad (2.2)$$

lub jako [45, 46]:

$$U_0 = \frac{1}{S_n T} \int_0^{T_E} \int_{S_n} u(t) \cdot dS \cdot dt \quad (2.3)$$

gdzie:

T_E – czas wydmuchu płynu z siłownika, s;

S_n – pole dyszy siłownika, m^2 .

2.1.2 Współczynnik wydmuchu i liczba Reynoldsa

Współczynnik L/d odnosi się do objętości medium, które jest wydmuchiwane z siłownika w czasie jednego cyklu pracy. Jeżeli porówna się objętość, o którą zmienia się komora w czasie wydmuchu, z wymyślnym walcem, o takiej samej objętości i średnicy równej średnicy dyszy siłownika (rys. 2.2) można zapisać, że:

$$\alpha \frac{\pi D^2}{4} h = \frac{\pi d^2}{4} L \quad (2.4)$$

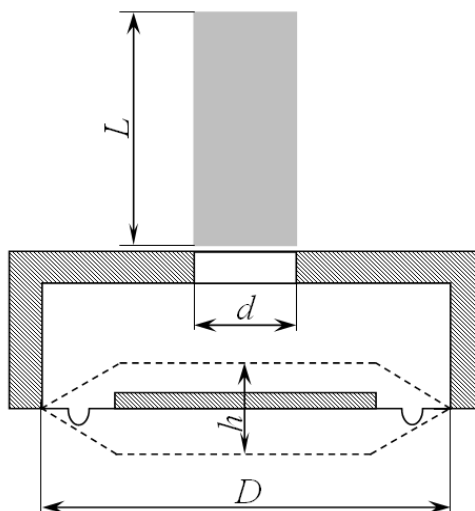
gdzie (poniższe parametry zostały dodatkowo przedstawione na rys. 2.2):

α – część objętości komory, która zmienia się w czasie przemieszczania się membrany z jednego skrajnego położenia w drugie o odległość h ;

D – średnica membrany, m;

d – średnica dyszy siłownika, m;

L – długość wydmuchu obliczona, m.



Rys. 2.2. Schemat siłownika, na którym objętość płynu roboczego wytłoczonego z komory roboczej przez ruch membrany została oznaczona formie walca

Po przekształceniu otrzymano:

$$L/d = \alpha h \frac{D^2}{d^3} \quad (2.5)$$

W przypadku siłowników o dyszy wylotowej w kształcie szczeliny współczynnik wydmuchu określa się analogicznie jako L/h , gdzie h jest dłuższym wymiarem szczeliny.

W związku z tym, że strumienie syntetyzowane mają charakter okresowy, definicja ich prędkości opiera się na ich strumieniu pędu lub strumieniu objętości [56]. Ich prędkość można zatem określić jest jako funkcję $U_0=(L/T)=fL$ w przypadku definicji opartej na strumieniu objętości lub jako $U_0=(L/T)\cdot 2^{0.5}=fL\cdot 2^{0.5}$ w przypadku definicji opartej na strumieniu momentu [31, 54, 57]. W obydwu przypadkach prędkość generowanych strumieni zależna jest bezpośrednio od częstotliwości pracy elementu wykonawczego oraz długości wydmuchu L . W związku z tym liczbę Reynoldsa Re dla danego siłownika przy definicji prędkości opartej na strumieniu objętości można wyznaczyć jako [31, 57]:

$$Re = \frac{U_0 d}{\nu} = \frac{f L d}{\nu} = \frac{f \alpha h D^2}{\nu} \quad (2.6)$$

gdzie:

f – częstotliwość pracy elementu wykonawczego, Hz;
 ν – lepkość kinematyczna, $m^2 \cdot s^{-1}$.

Analizując wzór (2.6) można zauważyć, że liczba Reynoldsa w przypadku strumieni syntetyzowanych zależna jest od częstotliwości pracy elementu wykonawczego f , amplitudy pracy elementu wykonawczego α oraz średnicy elementu wykonawczego D . Na tej podstawie można w łatwy sposób ocenić i porównać różne siłowniki syntetyzowane.

Jak wspomniano, prędkość strumieni syntetyzowanych można obliczyć ze wzoru $U_0 = fL$. W związku z tym współczynnik wydmuchu można obliczyć ze wzoru [51, 56]:

$$L = \int_0^{T_E} u(t) dt \quad (2.7)$$

2.1.3 Częstotliwość rezonansowa

Na rys. 2.3 przedstawiono osiowosymetryczny, akustyczny siłownik strumieni syntetyzowanych i jego uproszczony model fizyczny. Jak wykazano siłownik strumieni syntetyzowanych można przedstawić jako układ dwóch mas, tj. membrana głośnika m_d oraz słup powietrza m_n . Membrana głośnika umieszczona jest na zawieszaniach górnym oraz dolnym, które pełnią funkcje elementu sprężystego K oraz tłumiącego B . Zarówno masa membrany głośnika m_d oraz parametry K , B , jak i średnica membrany D zależne są od zastosowanego elementu wykonawczego (głośnika). Pozostałe parametry takie jak masa oscylującego płynu m_n , wysokość komory siłownika H , długość dyszy L_n oraz średnica dyszy d , są parametrami korpusu siłownika.

Masa płynu oscylującego m_n , może być wyliczona ze wzoru:

$$m_n = \rho L_e S_n \quad (2.8)$$

gdzie:

ρ – gęstość płynu roboczego, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
 S_n – pole przekroju dyszy siłownika, $S_n = \pi \cdot d^2 / 4$, m^2 ;
 L_e – wydłużona długość dyszy, m.

Wydłużona długość dyszy L_e oznacza długość pewnej objętości płynu w dyszy, którego masa ma wpływ na siły bezwładności powodowane poprzez przyspieszenie. Wartość ta jest zazwyczaj większa niż długość dyszy i może zostać obliczona w sposób teoretyczny ze wzoru [58]:

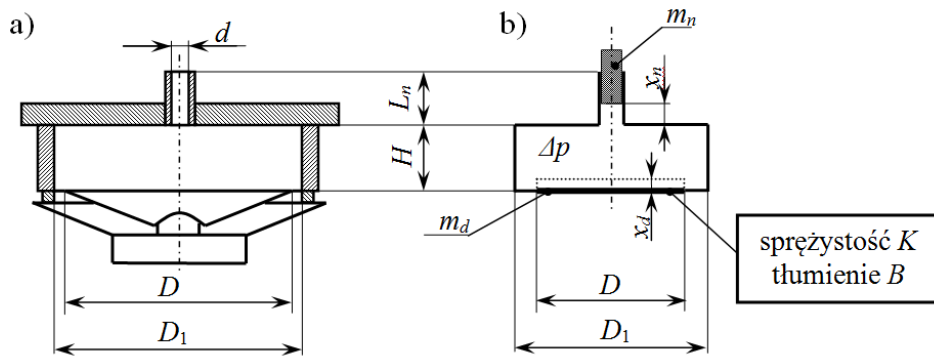
$$L_e = L_n + \frac{8d}{3\pi} \quad (2.9)$$

W [59] zaproponowano inne wartości wydłużonej długości dyszy L_e zależne od zaokrąglenia krawędzi wyjściowej dyszy lub jego braku. W przypadku dyszy o krawędzi zaokrąglonej wydłużona długość dyszy L_e może zostać obliczona ze wzoru:

$$L_e = L_n + 0,85d \quad (2.10)$$

Tymczasem w przypadku dyszy o krawędziach ostrych (niezaokrąglonych) – ze wzoru:

$$L_e = L_n + 0,725d \quad (2.11)$$



Rys. 2.3. Siłownik strumieni syntetyzowanych z głośnikiem jako elementem wykonawczym (a) i jego model (b)

Jak wspomniano, siłownik strumieni syntetyzowanych jest układem o dwóch stopniach swobody. W związku z tym ma dwie częstotliwości charakterystyczne: częstotliwość drgań własnych membrany głośnika f_n oraz częstotliwość drgań własnych masy płynu m_2 , tak zwaną częstotliwość

Helmholtza f_H (od nazwiska niemieckiego uczonego Hermanna von Helmholtza, który jako pierwszy opisał to zjawisko).

Dokładne obliczenie wartości obydwu częstotliwości jest bardzo skomplikowane, dlatego stosuje się wiele uproszczeń, jak pominięcie właściwości tłumiących zawieszonych membrany, pominięcie ściśliwości płynu roboczego, którego funkcję pełni najczęściej powietrze, i inne. W konsekwencji tego w literaturze można znaleźć wiele podejść do sposobu obliczania częstotliwości drgań własnych.

Przykładowo częstotliwość drgań własnych membrany f_n może zostać obliczona ze wzorów [33, 60, 55] (kolejność cytowań odpowiada kolejności wzorów):

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_d}} \quad (2.12)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_d + \frac{D^4}{d^4} m_n}} \quad (2.13)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{D} \sqrt{\frac{K}{m_d}} \quad (2.14)$$

Podczas gdy częstotliwość Helmholtza – ze wzoru [43, 45]:

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa \cdot S_n^2 \cdot p_b}{V_c \cdot m_n}} \quad (2.15)$$

gdzie:

κ – wykładnik adiabaty;

p_b – ciśnienie barometryczne, Pa;

V_c – objętość komory siłownika, $V_c = \pi \cdot D_1^2 / 4 \cdot H$.

Dodatkowo w [61] wyznaczono stosunek sprzężenia CR (ang. *couplin ratio*):

$$CR = \left(\frac{\omega_{wp}}{\omega_H} \right)^2 \quad (2.16)$$

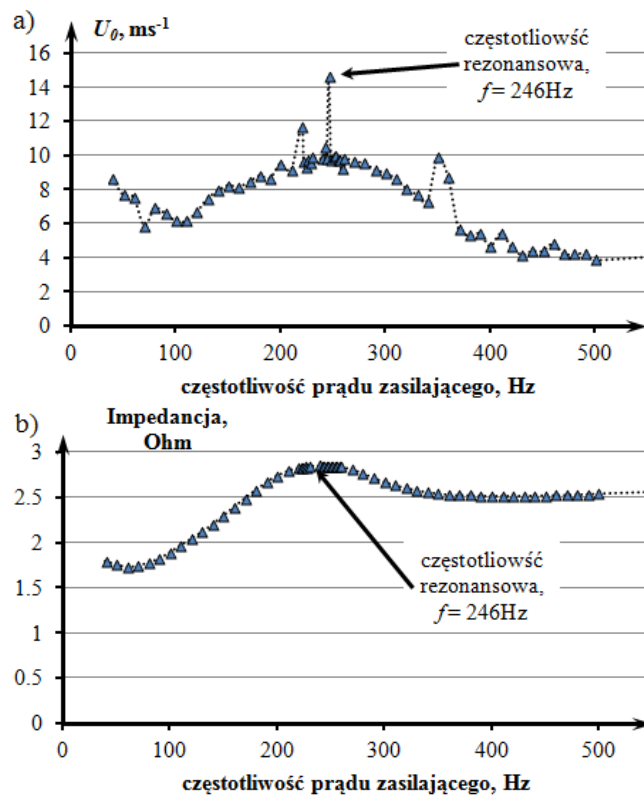
Stosunek sprzężenia CR reprezentuje stosunek „sztywności” powietrza w komorze siłownika o objętości V_c do sztywności membrany głośnika. W przypadku gdy $CR > 1$ mówi się o silnie sprzężonych oscylacjach. Wtedy największą prędkość strumieni uzyskuje się dla stosunkowo dużych wysokości komory H [61].

Częstość ω_{wp} oznacza częstość drgań własnych pneumatycznej sprężyny odpowiadającej komorze siłownika i może zostać obliczona ze wzoru:

$$\omega_{wp} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot S_c^2 \cdot p_b}{V_c \cdot m_d}} \quad (2.17)$$

gdzie:

S_c – pole przekroju poprzecznego komory, $S_c = \pi \cdot D_1^2/4$, m².



Rys. 2.4. Przykładowy sposób wyznaczania częstości rezonansowej na podstawie pomiaru: a) prędkości strumieni U_0 , b) impedancji siłownika w funkcji częstości

Należy podkreślić, że wzory mają charakter orientacyjny, a obliczona na ich podstawie częstość rezonansowa jest jedynie bliska wartościom rzeczywistych częstości rezonansowych badanego siłownika [62]. Z tego powodu częstość rezonansową siłownika wyznacza się poprzez pomiar prędkości lub impedancji siłownika w funkcji częstości przy stałej mocy zasilania [33, 63, 64]. Mianem częstości rezonansowej

określa się, w takim przypadku, częstotliwość, dla której impedancja układu lub prędkość generowanych strumieni U_0 jest największa. Przykładowe wyniki pomiarów f_n , na podstawie których można wyznaczyć częstotliwość rezonansową, przedstawiono na rys. 2.4.

2.1.4 Inne parametry strumieni syntetyzowanych

Do innych ważnych parametrów strumieni syntetyzowanych należy prędkość strumieni w osi dyszy $U_{0,c}$:

$$U_{0,c} = \frac{1}{T} \int_0^{T_E} u(x=0, r=0, t) dt \quad (2.18)$$

W pracy [38] wykazano, że prędkość strumieni syntetyzowanych U_0 można obliczyć na podstawie prędkości $U_{0,c}$ ze wzorów:

$$U_0 = \alpha U_{0,c} \quad (2.19)$$

$$\alpha = 0,384 + \sqrt{0,147 + \frac{0,64}{L_{0,cl}^*}} \quad (2.20)$$

$$L_{0,c}^* = \frac{U_{0,c} \cdot T}{d} \quad (2.21)$$

Skraca to czas pomiarów potrzebny do określenia prędkości U_0 oraz innych parametrów strumieni syntetyzowanych.

Inny ważny parametr strumieni to liczba Stokesa, która określa stosunek czasu relaksacji cząstek do charakterystycznego czasu przepływu [65] i obliczona dla strumieni syntetyzowanych ze wzoru [66]:

$$St = \sqrt{\frac{2\pi f d^2}{\nu}} \quad (2.22)$$

Liczbę Strouhala, będącą stosunkiem charakterystycznego czasu przepływu do okresu oscylacji [55, 57], określa się z zależności:

$$Sr = \frac{St^2}{Re} \quad (2.23)$$

Następnymi parametrami używanymi w analizie strumieni syntetyzowanych są: uśrednione w czasie objętościowe natężenie przepływu Q_0 , strumień pędu M_0 , oraz strumień energii kinetycznej E_0 :

$$Q_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T_E} \int_{S_n} u dS dt = U_0 S_n \quad (2.24)$$

$$M_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T_E} \int_{S_n} \rho u |u| \cdot dS \cdot dt \quad (2.25)$$

$$E_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T_E} \int_{S_n} \frac{\rho u^3}{2} \cdot dS \cdot dt \quad (2.26)$$

Ostatnim wartym nadmienienia parametrem jest sprawność siłownika:

$$\eta = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot S_n \cdot U_0^3}{P_{RMS}} \quad (2.27)$$

gdzie:

P_{RMS} – moc czynna zasilania siłownika, W.

Dodatkowe informacje dotyczące właściwości oraz parametrów strumieni syntetyzowanych można znaleźć w [31].

2.1.5 Nietradycyjne siłowniki strumieni syntetyzowanych

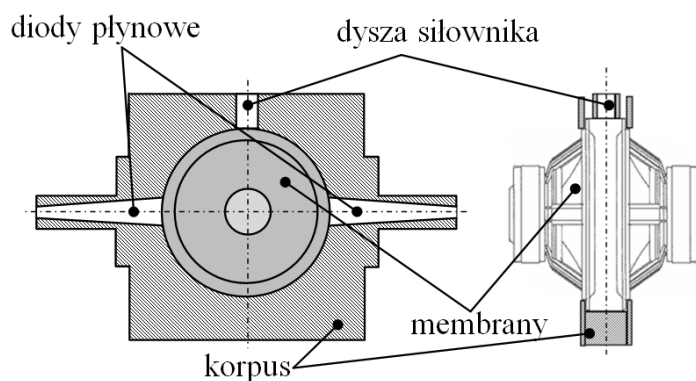
Spośród licznych publikacji przedstawiających różne aspekty strumieni syntetyzowanych niewiele dotyczy układów wielokrotnych i im pokrewnych (ang. *multiple sunthetic jet*) oraz hybrydowych strumieni syntetyzowanych (ang. *hybridic synthetic jet*).

Siłownik hybrydowych strumieni syntetyzowanych pierwszy raz opisano w [68]. Są wyposażone w jedną dysze główną oraz dwie diody płynowe w postaci przewodów stożkowych (rozszerzających się w kierunku komory siłownika). Mają najczęściej dwa elementy wykonawcze (zwykle membrany głośników), które poruszają się w przeciwnych kierunkach (jeżeli usadowione są naprzeciw siebie). Przykładowy model siłownika hybrydowych strumieni syntetyzowanych wraz z zaznaczonymi najważniejszymi elementami przedstawiono na rys. 2.5.

Hybrydowe strumienie syntetyzowane różnią się nieznacznie od strumieni syntetyzowanych, a różnice dotyczą przede wszystkim wydajności siłowników, a więc prędkości generowanych strumieni przy tej samej mocy zasilania siłownika [69]. Dodatkowe informacje na temat strumieni hybrydowych można znaleźć w [60], a ich wizualizacje – [70].

Jak wspomniano, siłowniki hybrydowych strumieni syntetyzowanych wyposażone są najczęściej w dwa elementy wykonawcze, podobnie jak siłownik strumieni syntetyzowanych w badanej dyszy osiowosymetrycznej. Należy zaznaczyć, że ze względu na różny mechanizm powstawania klasycznych oraz hybrydowych strumieni

syntetyzowanych nie jest możliwe przeniesienie wyników uzyskanych dla strumieni hybrydowych (generowanych przez siłownik z dwoma elementami wykonawczymi) na klasyczne strumienie syntetyzowane. Trzeba również dodać, że autor nie znalazł porównania różnic pomiędzy siłownikami (lub generowanymi przez nie strumieniami) hybrydowych strumieni syntetyzowanych z jednym lub wieloma elementami wykonawczymi.



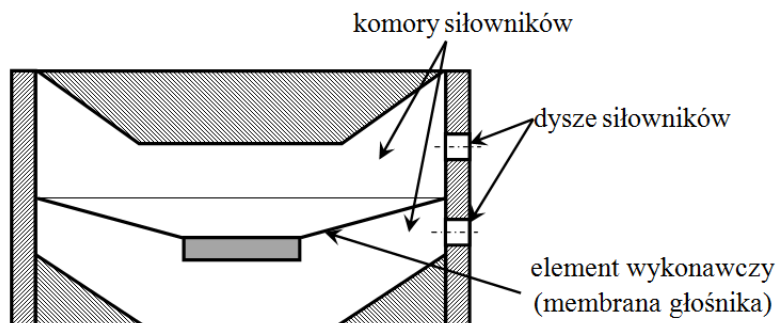
Rys. 2.5. Model siłownika hybrydowych strumieni syntetyzowanych

Jako układy wielokrotne siłowników strumieni syntetyzowanych można rozumieć zespoły siłowników z osobnymi elementami wykonawczymi lub wspólnym, których dysze umiejscowione są blisko siebie. Układy wielokrotne wykonuje się aby, wygenerować strumień sterujący mający parametry, których nie da się uzyskać w inny sposób.

Przykładowo w pracy [71] przedstawiono model zespołu czterech akustycznych siłowników strumieni syntetyzowanych, których dysze znajdowały się w bliskiej odległości. W eksperymencie badano, jak przesunięcie w fazie ruchu membran głośników (rozważano cztery warianty) wpływa na kształtowanie się strumieni syntetyzowanych. Najciekawszy ze względów wizualnych efekt (zdaniem autora) uzyskano w przypadku, gdy wszystkie membrany pracowały zgodnie w fazie, a strumienie generowane przez cztery samodzielne siłowniki łączyły się, tworząc jeden pierścieniowy strumień syntetyzowany. Znaczną część pracy poświęcono ponadto na porwanie prędkości strumienia w funkcji odległości od wylotu dyszy oraz analizie profili prędkości poszczególnych wariantów siłownika.

Innym przykładem są siłowniki bliźniacze (ang. *twin synthetic jet actuator*). Są to siłowniki ze wspólnym elementem wykonawczym. Przykładowy siłownik bliźniaczy przedstawiono na rys. 2.6. Siłowniki bliźniacze wykorzystywane są przede wszystkim w chłodnictwie [72] i

łączą w sobie korzyści stosowania dwóch siłowników umiejscowionych obok siebie [63, 64].



Rys. 2.6. Model akustycznego siłownika bliźniaczego

2.2 Zawory i dysze osiowosymetryczne

Zawory osiowosymetryczne należą do zaworów płynowych, a ich głównym elementem jest dysza osiowosymetryczna, zwana też pierścieniową, z powodu pierścieniowego kształtu kanału wylotowego.

Dysze tego rodzaju wykorzystano między innymi podczas chłodzenia poprzez zastosowanie strumienia uderzającego (ang. *impinging jet*) [38, 73–76]. W pracy [77] opisano dyszę osiowosymetryczną, używaną w procesie przenoszenia ciepła, dającą możliwość przesterowania strumienia głównego i uzyskania dwóch stabilnych stanów jego przepływu. Przesterowanie to odbywało się z wykorzystaniem dwóch strumieni sterujących – jednego wypływającego ze stożka zewnętrznego oraz drugiego wypływającego ze szczeliny pierścieniowej na obwodzie stożka zewnętrznego dyszy. Temat ten kontynuowano między innymi w pracach [47, 78], w których sterowanie odbywało się za pomocą tylko jednego strumienia sterującego.

W pracach [77, 79, 80] opisano jedne z pierwszych zaworów osiowosymetrycznych opierających się na kontynuacji wyżej przedstawionych dysz. Omówiono w nich proces tworzenia, koncepcje oraz badania zaworów osiowosymetrycznych. Zawory te były sterowane za pomocą dwóch strumieni sterujących. W efekcie tych prac w 2010 roku został zatwierdzony patent [49], w którym przedstawiono koncepcję zaworu osiowosymetrycznego sterowanego za pomocą siłownika strumieni syntetyzowanych (rys. 1.3). Patent ten zaowocował wieloma pracami, między innymi [30, 43, 45].

Należy podkreślić, że w przedstawionych pracach nie zostało udowodnione twierdzenie, że istnieje możliwość sterowania strumieniem osiowo-symetrycznym za pomocą strumieni syntetyzowanych. Omówiono

w nich głównie badanie wpływu strumieni syntetyzowanych na kształt profilu prędkości strumienia głównego, w pewnej odległości od wylotu dyszy (najczęściej 40 mm oraz 80 mm).

Na podstawie przedstawionych prac, w ramach współpracy Instytutu Termomechaniki, Czeskiej Akademii Nauk w Pradze oraz Zakładu Sterowania, Uniwersytetu Technologiczno - Przyrodniczego w Bydgoszczy udało się opracować nową dyszę osiowosymetryczną z wbudowanym w rdzeń siłownikiem strumieni syntetyzowanych, charakteryzującą się dwuelementowym siłownikiem strumieni syntetyzowanych oraz rdzeniem dyszy w postaci stożka (wcześniej stosowano głównie stożek ze ściętym wierzchołkiem [43, 45]). Dysza ta jest przedmiotem prezentowanej pracy.

Szczegółowe badania dotyczące procesu sterowania strumieniem głównym za pomocą strumienia ciągłego, w dyszy będącej przedmiotem tej pracy można znaleźć w [81]. Praca poświęcona jest zagadnieniu kształtowania parametrów dyszy osiowosymetrycznej w aspekcie procesu wymiany ciepła. Znaczną jej część poświęcono opisowi historii kształtowania się badanej dyszy osiowosymetrycznej oraz problemom, które pojawiły się w procesie jej projektowania. W pracach [81, 82] przedstawiono ponadto wizualizacje strumienia głównego w stanie stabilnym (z wyłączonym strumieniem sterującym) oraz po jego przesterowaniu (z włączonym strumieniem głównym).

Należy zaznaczyć, że we wszystkich przytoczonych pracach (dotyczących dyszy ze sterowaniem strumieniami syntetyzowanymi) dysze charakteryzowały się tylko jednym stanem stabilnym, a włączenie siłownika strumieni syntetyzowanych nie powodowało przełączenia stanu. Jedynym efektem była zmiana charakterystyki strumienia głównego, np. zmiana profilu prędkości lub wzrost turbulencji w przepływie.

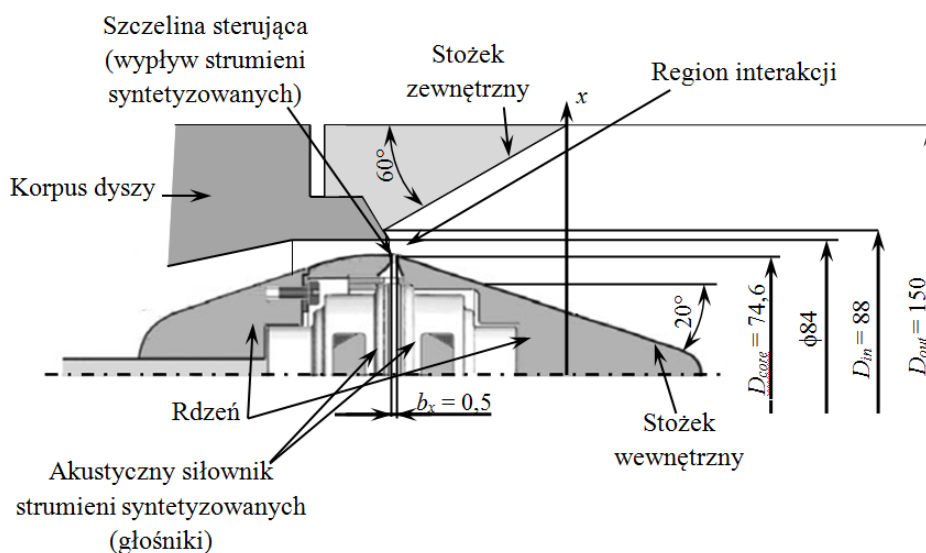
2.2.1 Dysza osiowosymetryczna – stanowisko badawcze

Na rys. 2.7 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 naprzeciwległe 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. 2.7 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 [83–85] 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 osiowoosymetrycznej oraz stożka zewnętrznego zawarto w załączniku 1.



Rys. 2.7. Rysunek poglądowy badanej dyszy wraz z wyróżnieniem najważniejszych elementów oraz wymiarów

2.2.2 Wskaźniki przesterowania

Działanie zaworu osiowoosymetrycznego zależy od wielu parametrów – zarówno płynu roboczego (gęstość, ciśnienie, temperatura itp.), jak i samego zaworu (chropowatość, wymiary geometryczne itp.). W celu porównywania różnych zaworów, dysz lub innych urządzeń przepływowych opracowano proste wskaźniki sterowania.

Wskaźniki sterowania są szybką i stosunkowo prostą metodą porównywania różnego rodzaju dysz i innych urządzeń [24, 30, 86]. Do podstawowych wskaźników w przypadku dyszy osiowoosymetrycznych należą stosunek prędkości c_U oraz stosunek natężenia przepływu c_Q . Jako stosunek prędkości należy rozumieć:

$$c_U = \frac{U_0}{U_m} \quad (2.28)$$

gdzie:

U_m – uśredniona w czasie prędkość strumienia głównego na początku regionu interakcji, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tymczasem jako stosunek objętości przepływu można przyjąć:

$$c_Q = \frac{U_0}{U_m} \frac{S_n}{S_m} \quad (2.29)$$

gdzie:

S_n – pole przekroju dyszy lub szczeliny, przez którą wypływają strumienie syntetyzowane, m^2 ;

S_m – pole przekroju dyszy na początku regionu interakcji, m^2 .

Wskaźniki te pozwalają ocenić jakość przesterowania strumienia niezależnie od wielkości czy sposobu wykonania dyszy. Należy jednak podkreślić, że stosunek prędkości c_U powinien być używany tylko do oceny dysz o podobnym rozmiarze albo ich koncepcji, ponieważ nie uwzględnia on wymiaru dyszy, regionu interakcji ani mocy i rodzaju siłownika strumieni syntetyzowanych.

3. METODA BADAWCZA

W przypadku badania strumieni określenie wszystkich ich parametrów (temperatura, rozkład ciśnienia, prędkość itp.) jest najczęściej niemożliwe. W przypadku strumieni syntetyzowanych, które charakteryzują się niewielkimi prędkościami oraz przepływem strumienia przez zawór osiowosymetryczny, gdzie różnice ciśnienia statycznego są stosunkowo niewielkie, parametrami charakterystycznymi dla strugi są jej prędkość (średnia, lub w punkcie), profil prędkości oraz natężenie przepływu. W związku z tym w rozdziale omówiono metody pomiarów prędkości, stosowane czasie badań oraz metody pomiarów natężenia przepływu.

3.1 Pomiar prędkości powietrza

3.1.1 Anemometr ciepłodrutowy

Pomiar prędkości powietrza odbywa się najczęściej poprzez zastosowanie rurki Pitota lub rurki Prandtla. Polega to na pomiarze ciśnienia dynamicznego, a następnie obliczeniu na tej podstawie prędkości w danym punkcie. Rurki należą do obiektów o stosunkowo dużych wymiarach i ich wprowadzenie do układu mogłoby spowodować duże zaburzenia (należy pamiętać, że szczelina wylotowa w rdzeniu dyszy ma szerokość $b_x = 0,5$ mm). W związku z tym do pomiarów strumieni syntetyzowanych używane są głównie anemometrów termicznych ciepłodeutowych (ang. *hot-wire anemometer*, HWA) pracujące w trybie stałotemperaturowym (ang. *constant-temperature anemometer*, CTA) lub trybie stałego natężenia przepływu (ang. *constant-current probe*) [87]. W czasie badań wykorzystywano sondy CTA.

Pomiar prędkości sondą włókową pracującą w trybie stałej temperatury odbywa się poprzez zmierzenie napięcia na sondzie. Jego zmiana wynika z prędkości przekazywania ciepła na drodze włókno – ośrodek, a strumień ciepła oddawany do otoczenia może być opisany jako [87]:

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{fc} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_s \quad (3.1)$$

gdzie:

$d\dot{Q}_e$ – strumień wytwarzanego ciepła, $J \cdot s^{-1}$;

$d\dot{Q}_{fc}$ – strumień konwekcji ciepła, $J \cdot s^{-1}$;

$d\dot{Q}_c$ – strumień ciepła przewodzonego, $J \cdot s^{-1}$;

$d\dot{Q}_r$ – strumień promieniowania ciepła, $J \cdot s^{-1}$;

$d\dot{Q}_s$ – strumień akumulowanego ciepła, $J \cdot s^{-1}$.

Analityczne określenie zależności między prędkością a napięciem na sondzie jest bardzo skomplikowane, dlatego wykonuje się to w sposób eksperymentalny. Kalibracja sondy odbywa się poprzez naprzemienny pomiar napięcia na sondzie oraz prędkości w tym samym punkcie przepływu ustalonego. Kalibracja może przebiegać z wykorzystaniem sondy skalibrowanej, rurki Pitota lub innych urządzeń pozwalających określić prędkość w punkcie pomiarowym. Po dokonaniu serii pomiarów dla różnych prędkości należy wyznaczyć zależność między prędkością zmierzoną a napięciem.

Zakres prędkości mierzonej jest ograniczony w zależności od stosowanego typu sondy. Jednak ze względu na wysoką temperaturę drutu sondy pracującej w trybie CTA – ok. $250^{\circ}C$ – nie zaleca się pomiarów dla prędkości $u < 1m \cdot s^{-1}$. Jest to spowodowane konwekcją w okolicy drutu sondy [87].

Żadna metoda kalibracji nie zapewnia bezbłędnego odwzorowania prędkości w funkcji napięcia. Przyjmuje się, że wraz ze wzrostem turbulencji przepływu błąd pomiaru rośnie [87]. W celu zniwelowania wpływu turbulencji na błąd pomiarowy stosuje się metodę $V_e(t)$ lub metodę $E(t)$. Obydwie metody polegają na wprowadzeniu współczynnika korelacji zależnych od intensywności turbulencji Ti (zdefiniowano w dalszej części rozdziału). W przypadku metody $V_e(t)$ jest to współczynnik korygujący obliczoną prędkość, natomiast w przypadku $E(t)$ – napięcie prądu [87]. Przykładowe współczynniki dla obydwu metod w zależności od intensywności turbulencji podano w tabeli 3.1. Należy zwrócić uwagę na stosunkowo niewielki wpływ turbulencji na zmierzoną prędkość.

Tabela 3.1. Przykładowe współczynniki korelacyjne dla metody $V_e(t)$ oraz $E(t)$

Ti , %	metoda $V_e(t)$	metoda $E(t)$
10	1,003	1,006
20	1,01	1,02
30	1,03	1,05

Zależność między prędkością a napięciem określa funkcja kalibracyjna. Podstawową funkcję kalibracyjną wyprowadził King w 1914 roku, który wyraził ją wzorem [87]:

$$E^2 = A + BU^n \quad (3.2)$$

gdzie:

E – napięcie na sondzie, V;

U – prędkość strugi, $m \cdot s^{-1}$;

n – współczynnik kalibracji;
 A, B – stałe empiryczne kalibracji.

King zaproponował w swojej pracy, żeby współczynnik kalibracji $n = 0,5$, jednak w 1959 roku Collins i Williams wykazali, że optymalną wartością współczynnika jest $n = 0,45$ [87].

Kalibracja stosowanych sond odbywała się poprzez sporządzenie tablicy kalibracyjnej. Wartości pośrednie pomiędzy punktami kalibracyjnymi liczone są poprzez liniową aproksymację między punktami. Przykładową tablicę kalibracyjną wraz z omówieniem, przedstawiono w załączniku 2.

Pojedynczy pomiar prędkości w punkcie odbywa się najczęściej poprzez pomiar cyfrowego sygnału napięcia na sondzie pomiarowej. W takim przypadku każdą próbkę sygnału przelicza się na prędkości U_i , na podstawie których można obliczyć następujące parametry dla danego punktu pomiarowego [88]:

- wartość średnią prędkości:

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_i^N U_i \quad (3.3)$$

- odchylenie standardowe prędkości:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (U_i - \bar{U})^2} \quad (3.4)$$

- intensywność turbulencji:

$$Ti = \frac{U_{rms}}{\bar{U}} \quad (3.5)$$

- skośność rozkładu:

$$S = \frac{\sum_i^N (U_i - \bar{U})^3}{N - U_{rms}^3} \quad (3.6)$$

- kurtozę rozkładu:

$$K = \frac{\sum_i^N (U_i - \bar{U})^4}{N - U_{rms}^4} \quad (3.7)$$

gdzie:

N – liczba próbek pomiarowych.

W czasie pomiarów wykorzystywano jednowłóknowe sondy 55P16 podłączone do anemometru termicznego MiniCta 54T30. Akwizycja danych odbywała się za pośrednictwem modułu NI9215 podpiętego do komputera osobistego. Dodatkowo w celu pomiaru temperatury do modułu NI9215 podpięto moduł 55T40 z przyłączoną sondą 90P10. Wszystkie elementy spięto ze sobą za pomocą kabli sygnałowych A1863 o długości $L = 4$ m i impedancji wewnętrznej $Z = 50 \Omega$. Wszystkie elementy układu pomiarowego, z wyjątkiem modułu akwizycji danych NI1863 firmy National Instruments, zostały wyprodukowane przez firmę Dantec Dynamics. Pomiary odbywały się z wykorzystaniem programowania StreamWare Basic 5.14 firmy Dantec Dynamics. W tabeli 3.2 przedstawiono przykładowe parametry stosowanych sond.

Tabela 3.2. Przykładowe parametry sondy 55P16

Sonda	55P16
Środowisko pomiarowe	powietrze
Materiał włókna	wolfram powlekany platyną
Średnica włókna	5 μm
Długość	1,25 mm
Rezystancja w 20°C R_{20}	3,20 Ω
Temperaturowy współczynnik oporności (TCR), α_{20}	0,0036 K^{-1}
Maksymalna temperatura pracy, T_{MAX}	300°C

3.1.2 Anemometr wiatrakowy

W czasie badań wykorzystywano również anemometr wiatrakowy testo 491 z sondą o średnicy pomiarowej $\phi 60$ o 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 od tego, co większe. W przypadku odchyłu osi pomiarowej sondy od osi przepływu powietrza o 10% błąd pomiaru wynosi dodatkowo $\pm 3\%$ wartości zmierzonej.

3.2 Pomiar natężenia przepływu

Pomiary objętościowego natężenia przepływu wykonywano za pomocą rotametrów firmy VEB MLW Prüfgeräte - Werk Medingen Sitz

Freital o zakresach $20\div 90 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ oraz $200\div 1000 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$. Dodatkowo wykorzystywano elektroniczny, termiczny, masowy miernik przepływu 4045 firmy TSI o zakresie pomiarowym $0\div 300 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ o dokładności dla powietrza $\pm 2\%$ odczytu lub $0,1 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ (w zależności od tego, która wartość jest większa).

3.3 Plan badań – weryfikacja hipotezy

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

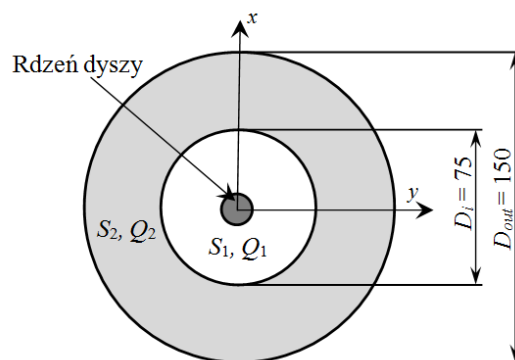
W związku z tym określono niezależne zmienne wejściowe wykorzystywane w trakcie pomiaru strumienia głównego:

Q_m – objętościowe natężenie strumienia głównego, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$;

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. 2.7) strumień objętości przepływający przez powierzchnię pierścieniową S_2 (rys. 3.1) 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 osiowosymetrycznym w badanej dyszy.



Rys. 3.1. Reprezentacja graficzna powierzchni pomiarowej wraz z najważniejszymi oznaczeniami

Płaszczyzna pomiarowa zaprezentowana na rys. 3.1 pokrywa się z osią x uwzględnioną na rys. 2.7. 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, $m \cdot s^{-1}$.

3.3.1 Etap pierwszy

Pierwszym etapem badań były 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.

W badaniach porównano siłowniki akustyczne osiowosymetryczne z jednym i dwoma elementami wykonawczymi. Porównaniu poddano między innymi prędkości generowanych strumieni oraz sprawność siłownika z jednym i dwoma elementami. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem siłownika stosowanego w dyszy osiowosymetrycznej.

Następnie zbadano wpływ przesunięcia fazowego napięcia zasilającego głośniki na generowane strumienie syntetyzowane. Miało to na celu zweryfikowanie, czy istnieje możliwość sterowania prędkością generowanych strumieni za pomocą przesunięcia fazowego prądu zasilającego.

Kolejnym krokiem było zbadanie wpływu zmiany geometrii dwuelementowego siłownika strumieni syntetyzowanych na jego parametry. Analizie poddano wpływ średnicy dyszy siłownika oraz odległości między głośnikami. Badania te miały pomóc przy ewentualnym przeprojektowywaniu siłownika strumieni syntetyzowanych. Wyniki porównano z podobnymi badaniami przeprowadzonymi na akustycznych

siłownikach strumieni syntetyzowanych z jednym elementem wykonawczym.

3.3.2 Etap drugi

Etap drugi eksperymentu to badania strumienia głównego, a w szczególności – jego osiowosymetryczności, oraz badanie wpływu strumieni syntetyzowanych na strumień główny.

Na tym etapie pracy sprawdzono rozkład strumienia głównego w szczelinie osiowosymetrycznej oraz wyznaczono jego profil prędkości w osi x (rys. 2.7), leżącej na płaszczyźnie pokrywającej się z „wierzchołkiem” stożka zewnętrznego.

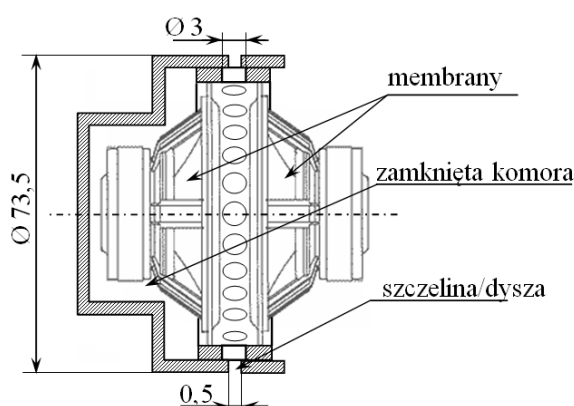
Następnym krokiem była weryfikacja hipotezy badawczej. Badania polegały na pomiarze profilu prędkości strumienia głównego w osi x (rys. 2.7) przy wyłączonym i włączonym strumieniu sterującym. Badania zostaną przeprowadzone dla trzech różnych wartości mocy czynnej zasilania siłownika oraz dla trzech różnych natężeń przepływu strumienia głównego. Na podstawie pomiarów obliczono wskaźniki sterowania.

Na końcu skonstruowano zawór osiowosymetryczny wykorzystujący badaną dyszę osiowosymetryczną. Celem badań było wyznaczenie wartości objętościowego natężenia przepływu w kanałach wewnętrznym i zewnętrznym dla trzech wartości mocy czynnej zasilania siłownika oraz pięciu wartości objętościowego natężenia przepływu strumienia głównego. Na podstawie obliczeń zostaną wskaźniki sterowania.

W efekcie przeprowadzonych na tym etapie prac rozstrzygnięto o poprawności postawionej hipotezy pracy.

4. STRUMIENIE STERUJĄCE – STRUMIENIE SYNTETYZOWANE

Na rys. 4.1 przedstawiono uproszczony schemat budowy stosowanego siłownika strumieni syntetyzowanych. Dokładny opis siłownika zamieszczono w rozdziale 2.2.1, natomiast dokładne rysunki – w załączniku 1. Do budowy siłownika wykorzystano głośniki Monacor SP-6/8SQ o impedancji wewnętrznej 8Ω oraz mocy znamionowej $P_{RMS} = 10$ W i mocy maksymalnej $P_{MAX} = 20$ W.

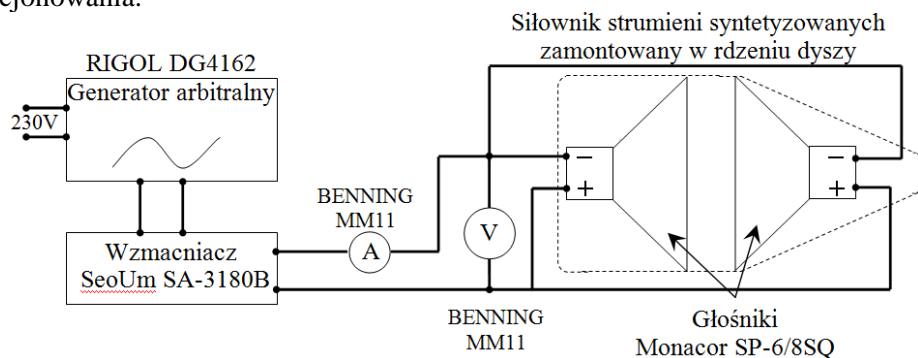


Rys. 4.1. Rysunek stosowanego siłownika strumieni syntetyzowanych wraz z zaznaczonymi najważniejszymi wymiarami oraz elementami

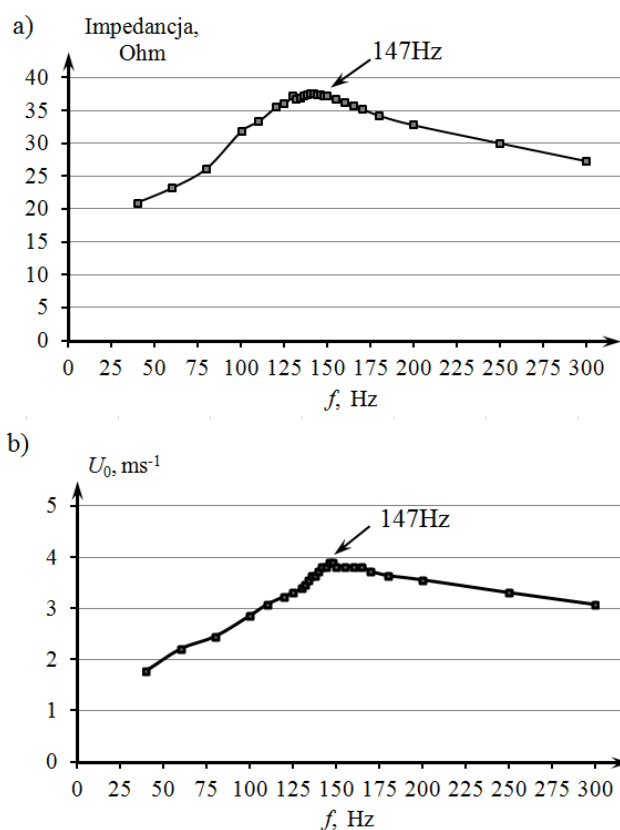
Schemat zasilania siłownika wykorzystywany podczas wszystkich pomiarów (chyba że zaznaczono inaczej) przedstawiono na rys. 4.2. Głośniki podłączono równolegle, co pozwoliło na zwiększenie maksymalnego skutecznego natężenia prądu zasilającego (obliczonego dla wartości mocy znamionowej $P_{RMS} = 10$ W) do $I_{MAX} = 1,58$ A. Wartość mocy czynnej określano na podstawie pomiaru napięcia i natężenia skutecznego za pomocą mierników multimetrycznych Benning M11 w układzie z poprawnie mierzonym napięciem. Pomiar przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem a natężeniem prądu, w całym stosowanym zakresie częstotliwości odbył się z wykorzystaniem oscyloskopu. W trakcie odbywania pomiarów oscylator odłączano, gdyż wprowadzał dodatkowe zaburzenia do układu. Dokładność odczytu mocy czynnej P_{RMS} wynosiła $\pm 3\%$.

Elementy wykonawcze siłownika połączone równolegle. Połączenie szeregowo jest w tym przypadku niekorzystne pod względem energetycznym (ograniczeniem mocy zasilania jest natężenie prądu I_{MAX}). Głośniki w układzie szeregowym mogłyby ponadto wpływać na siebie, co

powodowałyby powstanie trudnych do przewidzenia zaburzeń ich funkcjonowania.



Rys. 4.2. Schemat elektryczny zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych wraz z układem do pomiaru mocy



Rys. 4.3. Wyznaczenie częstotliwości charakterystycznej na podstawie: (a) impedancji siłownika, (b) prędkości strumieni syntetyzowanych, przy mocy skutecznej prądu zasilającego $P = 1 \text{ W}$

Siłownik zasilano z wykorzystaniem arbitralnego generatora funkcji Rigol DG4162 oraz wzmacniacza SeoUm Sa-3180B. Obydwa urządzenia mają dwa kanały wyjściowe.

Na rys. 4.3 przedstawiono zależność między częstotliwością prądu zasilającego siłownik strumieni syntetyzowanych f a impedancją układu (rys. 4.3a) oraz prędkością charakterystyczną strumieni syntetyzowanych U_0 (rys. 4.3b). Pomiar odbywał się w odległości ok. 1 mm od szczeliny siłownika przy stałej mocy prądu zasilającego. Należy nadmienić, że częstotliwość pracy siłownika utożsamia się z częstotliwością prądu zasilającego i wyrażenia te mogą być używane naprzemiennie.

Pomiary impedancji oraz prędkości charakterystycznej U_0 pozwoliły na wyznaczenie pierwszej charakterystycznej częstotliwości ($f = 147$ Hz) pracy siłownika strumieni syntetyzowanych, odpowiadającej częstotliwości drgań własnych membrany f_n .

Pomiar prędkości charakterystycznej U_0 przedstawionej na rys. 4.3 odbył się za pomocą anemometru termicznego pracującego w trybie CT. Zarówno w tym jak i we wszystkich opisywanych w tym rozdziale pomiarach (chyba, że zaznaczono inaczej) jako prędkość charakterystyczną U_0 rozumie się prędkość obliczoną na podstawie wzoru (2.2) uśrednioną dla co najmniej sześciu pełnych okresów pracy siłownika. Dodatkowo przyjęto, że minimalna liczba próbek przypadających na pomiar, w tym przypadku czas sześciu pełnych okresów pracy siłownika, wynosi $n = 512$. W związku z powyższym podczas określania częstotliwości próbkowania posługiwano się wzorem:

$$f_s = \frac{n \cdot f}{6}, \quad n \geq 512 \quad (4.1)$$

gdzie:

f_s – częstotliwość próbkowania, Hz;

n – liczba próbek;

f – częstotliwość pracy siłownika, Hz.

Maksymalna wartość częstotliwości próbkowania wynosi $f_s = 100$ kHz, w związku z tym maksymalna częstotliwość pracy siłownika strumieni syntetyzowanych, jaką można osiągnąć wynosi $f = 1170$ Hz.

Maksymalna stosowana częstotliwość pracy akustycznych siłowników strumieni syntetyzowanych, jaką stosowano w analizowanej literaturze, wynosiła 600 Hz [89]. W związku z tym uznano założenie przyjęte za wystarczające i możliwe do zastosowania w przypadku wszystkich badań dotyczących akustycznych siłowników syntetyzowanych.

Program wykorzystywania do obliczeń prędkości strumieni syntetyzowanych na podstawie pomiarów przedstawiono w Załączniku 3.

4.1 Siłownik z jednym oraz dwoma elementami wykonawczymi

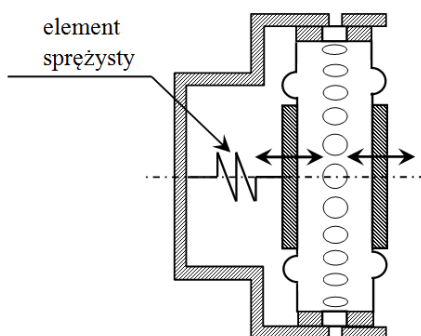
Jednym z ważniejszych celów badań jest porównanie siłowników strumieni syntetyzowanych: z jednym oraz dwoma elementami wykonawczymi. Aby przeprowadzić to zestawienie, na podstawie badanego siłownika, przedstawionego w uproszczony sposób na rys. 4.1, przygotowano trzy modele siłownika:

- osiowosymetryczny – akustyczny siłownik strumieni syntetyzowanych z jednym elementem wykonawczym pracującym w warunkach normalnych (przypadek 1);
- osiowosymetryczny – akustyczny siłownik strumieni syntetyzowanych z jednym elementem wykonawczym, za którym znajduje się zamknięta komora (przypadek 2);
- osiowosymetryczny – akustyczny siłownik strumieni syntetyzowanych z dwoma elementami wykonawczymi (pracującymi zgodnie w fazie), z których jeden pracuje w warunkach normalnych, natomiast za drugim znajduje się zamknięta komora (przypadek 3).

Membranę głośnika, który nie pełnił funkcji elementu wykonawczego siłownika, unieruchomiono mechanicznie na czas pomiarów, natomiast głośnik odłączono od zasilania. Siłowniki w czasie badań pracowały w częstotliwości $f = 147$ Hz.

4.1.1 Wpływ komory na pracę siłownika

Na rys. 4.4 przedstawiono model fizyczny siłownika zaprezentowanego na rys. 4.1. Membrany głośników zastąpiono z wykorzystaniem mas, których periodyczny ruch zaznaczono strzałkami; natomiast zamkniętą komorę za siłownikiem przedstawiono za pomocą elementu sprężystego.



Rys. 4.4. Model fizyczny siłownika z dwoma elementami wykonawczymi

W celu potwierdzenia przyjętego schematu należy przyjąć pewne uproszczenia:

- 1) masa powietrza w komorze jest stała, a więc komora jest idealnie szczelna;
- 2) ciśnienie w zamkniętej komorze jest równe co do wartości ciśnieniu barometrycznemu ($p_0 = p_b$) w przypadku gdy membrana znajduje się w stanie równowagi (głośnik jest wyłączony);
- 3) ciśnienie panujące w komorze siłownika jest w każdej chwili równe co do wartości ciśnieniu barometrycznemu p_b i w stanie równowagi równoważą działanie ciśnienia powietrza znajdującego się w zamkniętej komorze za głośnikiem;
- 4) komora może być przedstawiona jako walec o stałej średnicy równej co do wartości średnicy głośnika D_s oraz wysokości l_0 , która zmienia się w trakcie pracy głośnika i wynosi $l=l_0+\Delta l$.

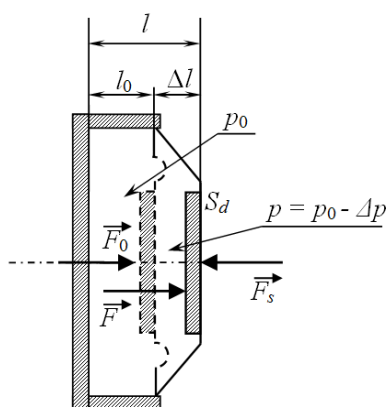
Na podstawie przyjętych uproszczeń przygotowano model fizyczny membrany głośnika z zamkniętą komorą przedstawiony na rys. 4.5. Jak zaznaczono na rysunku, w warunkach normalnych siła wywierana na membranę głośnika przez powietrze w zamkniętej komorze o ciśnieniu p_0 jest równa F_0 . Zgodnie z założeniami komora ma średnicę $S_d = \pi \cdot D_s^2$ oraz wysokość l_0 . W związku z tym siłę F_0 można obliczyć na podstawie równania gazu doskonałego w postaci:

$$p_0 \cdot l_0 \cdot S_d = R \cdot T \quad (4.2)$$

gdzie:

R – uniwersalna stała gazowa, $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

T – temperatura powietrza, K.



Rys. 4.5. Model fizyczny membrany głośnika z zamkniętą komorą i uwzględnieniem wybranych parametrów oraz działających sił

Równanie (4.2) przekształcamy, tak aby obliczyć siłę F_0 :

$$p_0 \cdot S_d = \frac{R \cdot T}{l_0} \quad (4.3)$$

$$F_0 = \frac{R \cdot T}{l_0} \quad (4.4)$$

W przypadku gdy membrana wysuwa się do pozycji maksymalnej, siła wywierana przez ciśnienie powietrza w zamkniętej komorze, działająca na membranę, wynosi:

$$F = \frac{R \cdot T}{l_0 + \Delta l} \quad (4.5)$$

Na tej podstawie siłę działającą na membranę w czasie jej pracy można obliczyć jako różnicę siły F oraz siły F_0 , która jest równoważona przez siłę działającą na membranę spowodowaną przez ciśnienie w komorze siłownika (nie jest zaznaczona na rys. 4.5). W związku z tym siłę wywieraną na membranę można obliczyć ze wzorów:

$$F_s = F - F_0 \quad (4.6)$$

$$F_s = \frac{R \cdot T}{l_0 + \Delta l} - \frac{R \cdot T}{l_0} \quad (4.7)$$

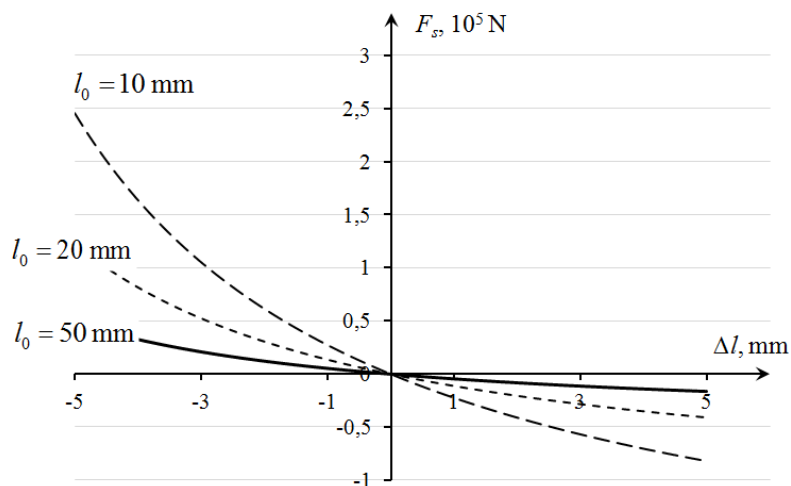
$$F_s = -R \cdot T \frac{\Delta l}{l_0(l_0 + \Delta l)} \quad (4.8)$$

Na podstawie wzoru (4.8) można przyjąć, że zamknięta komora znajdująca się za membraną głośnika działa jak nieliniowy element sprężysty. Należy zauważyć, że siła sprężystości tego elementu jest odwrotnie proporcjonalna do rozmiarów komory. Przykładowe charakterystyki takiego nieliniowego elementu sprężystego przedstawiono na rys. 4.6.

Siła wywierana na membranę jest bardzo niewielka, nawet przy małych rozmiarach komory. Należy zwrócić uwagę, że charakterystyka jest praktycznie liniowa w przypadku ruchu membrany do przodu (zwiększenie objętości komory), natomiast silną nieliniowość obserwuje się przy cofaniu się membrany (zmniejszenie objętości komory). W przypadku wartości wysokości komory $l_0 = 50$ mm charakterystyka analizowanego elementu jest praktycznie liniowa.

Należy zauważyć, że objętość komory znajdującej się za głośnikiem (w przypadku siłownika osiowosymetrycznego) jest niewielka (Załącznik 1). Oznacza to, że wpływ komory na pracę siłownika, a więc na

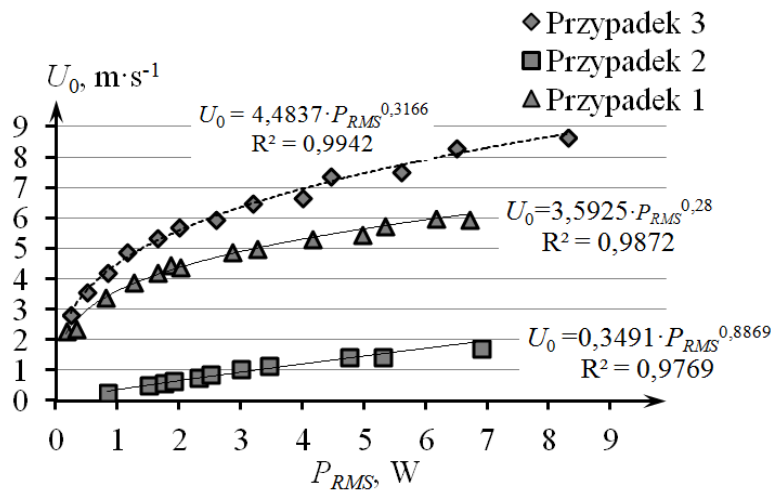
generowane strumienie syntetyzowane, powinien być znaczny. Pomimo to przemieszczenie membrany głośnika jest niewielkie.



Rys. 4.6. Charakterystyka nieliniowego elementu sprężystego, którego funkcję pełni zamknięta komora, w zależności od przesunięcia membrany i wysokości komory

4.1.2 Wyniki eksperymentu

Na rys. 4.7 przedstawiono charakterystykę prędkości strumieni syntetyzowanych U_0 w funkcji mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika dla trzech rozpatrywanych przypadków. Dodatkowo, na podstawie aproksymacji, wyznaczono $U_0(P_{RMS})$. Wyznaczono kwadrat współczynnika korelacji R^2 , który w trzech rozpatrywanych przypadkach był większy niż 0,9. Odpowiada to korelacji niemal pełnej, według klasyfikacji J. Guilforda.



Rys. 4.7. Prędkość charakterystyczna U_0 strumieni syntetyzowanych w funkcji mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika

Należy zaznaczyć, że kryterium rozpatrywanym przez Guilforda jest współczynnik korelacji $|R|$, nie R^2 . W przypadku korelacji niemal całkowitej zachodzi zależność $|R| > 0,9$ co odpowiada zależności $R^2 > 0,81$. Warunek ten został spełniony.

Minimalna wartość mocy czynnej P_{RMS} , dla której możliwa była rejestracja prędkości (przy stosowanych metodach) lub siłowniki zaczynały generować strumienie syntetyzowane, wynosiła $P_{RMS} = 0,20$ W (poniżej tej wartości głośniki nie reagowały na zasilanie) w przypadkach 1, 3 oraz $P_{RMS} = 0,84$ W (poniżej tej wartości głośniki pracowały, jednak nie był możliwy pomiar prędkości strumieni syntetyzowanych) w przypadku 2. Wiąże się to z prędkością generowanych strumieni. W związku z ograniczeniem wynikającym z maksymalnej wartości prądu I_{MAX} maksymalna wartość mocy czynnej wynosiła $P_{RMS} = 6,7$ W w przypadku 1, $P_{RMS} = 6,9$ W w przypadku 2, $P_{RMS} = 8,3$ W w przypadku 3. Prędkość charakterystyczna strumieni U_0 mieściła się w zakresie $2,27 \leq U_0 \leq 5,97$ w przypadku 1, $0,26 \leq U_0 \leq 1,69$ w przypadku 2, $2,82 \leq U_0 \leq 8,64$ w przypadku 3.

W czasie porównania parametrów strumieni syntetyzowanych, takich jak: strumień pędu M_0 , strumień energii kinetycznej E_0 oraz sprawność elektryczna siłownika strumieni syntetyzowanych η . Do obliczeń wykorzystano wartości obliczone na podstawie wzorów przedstawionych na rys. 4.6:

- przypadek 1 – $U_0 = 3,5925 \cdot P_{RMS}^{0,28}$;
- przypadek 2 – $U_0 = 0,3491 \cdot P_{RMS}^{0,8869}$;
- przypadek 3 – $U_0 = 4,4837 \cdot P_{RMS}^{0,3166}$.

Zależności wybranych parametrów od mocy czynnej zasilania P_{RMS} obliczone na podstawie powyższych funkcji przedstawiono na rys. 4.8.

W czasie obliczeń przyjęto założenie $P_{RMS} < 7$ W, tak aby maksymalna wartość mocy pokrywała się z maksymalną wartością mocy czynnej (lub aby te moce były sobie bliskie co do wartości), dla której wyznaczono prędkość charakterystyczną U_0 we wszystkich trzech przypadkach (rys. 4.7). Ponadto wykresy analizowano jedynie dla wartości mocy czynnej $P_{RMS} > 0,2$ W w przypadkach 1 oraz 3, natomiast w przypadku 2 – $P_{RMS} > 0,84$ W. Odpowiada to minimalnym wartościom mocy czynnych uzyskanych w czasie pomiaru prędkości charakterystycznej (rys. 4.7).

Na rys. 4.8a przedstawiono strumień pędu M_0 generowanych strumieni w funkcji mocy czynnej P_{RMS} . Wartość strumienia pędu M_0 rośnie proporcjonalnie do mocy zasilania siłownik P_{RMS} i osiąga najwyższą wartość w przypadku 3. Dla mocy czynnej $P_{RMS} = 7$ W wartość strumienia pędu M_0 w przypadku 3 jest o 79,61% wyższa niż w przypadku 1 oraz prawie osiemnaście razy większa niż w przypadku 2. Wartości strumieni pędu M_0 mieszczą się w zakresach:

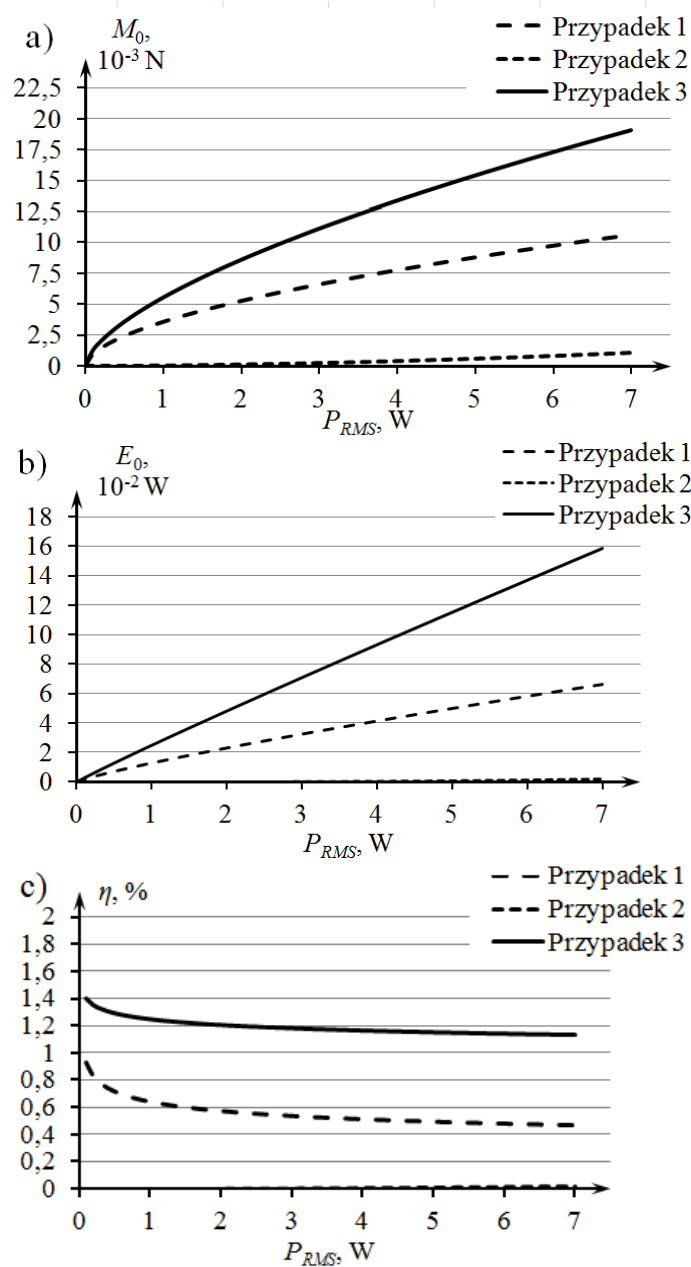
- $0,98 \cdot 10^{-3} \text{ N} \leq M_0 \leq 10,63 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ w przypadku 1;
- $0,02 \cdot 10^{-3} \text{ N} \leq M_0 \leq 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ w przypadku 2;
- $2,01 \cdot 10^{-3} \text{ N} \leq M_0 \leq 19,10 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ w przypadku 3.

Funkcja strumienia energii kinetycznej E_0 generowanych strumieni w funkcji mocy czynnej zasilania P_{RMS} , przedstawiona na rys. 4.8b, ma charakter liniowy. Najwyższe wartości energii kinetycznej E_0 osiągnięto dla przypadku 3, natomiast najniższe – dla przypadku 2. Wartości energii kinetycznych E_0 mieszczą się w zakresach:

- $0,33 \cdot 10^{-2} \text{ J} \leq M_0 \leq 6,59 \cdot 10^{-2} \text{ J}$ w przypadku 1;
- $0,02 \cdot 10^{-2} \text{ J} \leq M_0 \leq 0,22 \cdot 10^{-2} \text{ J}$ w przypadku 2;
- $0,54 \cdot 10^{-2} \text{ J} \leq M_0 \leq 15,86 \cdot 10^{-2} \text{ J}$ w przypadku 3.

Na rys. 4.8c przedstawiono sprawność η badanych siłowników strumieni syntetyzowanych w funkcji mocy czynnej P_{RMS} prądu zasilającego. W przypadkach 1 oraz 3 najwyższe wartości otrzymano dla $P_{RMS} = 0,2$ W (odpowiednio 0,83% oraz 1,35%). Wartość sprawności η malała wraz ze wzrostem mocy elektrycznej P_{RMS} . W przypadku 2 funkcja $\eta(P_{RMS})$ ma charakter liniowy i jest funkcją rosnącą. Wartości sprawności η badanych siłowników strumieni syntetyzowanych mieszczą się w zakresach:

- $0,83\% \geq \eta \geq 0,47\%$ w przypadku 1;
- $0,0004\% \leq \eta \leq 0,014\%$ w przypadku 2;
- $1,35\% \geq \eta \geq 1,13\%$ w przypadku 3.



Rys. 4.8. Zależność wybranych parametrów rozpatrywanych siłowników strumieni syntetyzowanych w funkcji mocy czynnej prądu zasilającego P_{RMS} : (a) strumienia pędu M_0 , (b) strumienia energii kinetycznej E_0 , (c) sprawności η

4.1.3 Analiza badań

Zamknięta komora znajdująca się za membraną głośnika, zgodnie z przewidywaniami, ma istotny wpływ na charakterystykę pracy siłownika strumieni syntetyzowanych. Maksymalna zmierzona prędkość strumieni syntetyzowanych U_0 w przypadku 2 była ponad czterokrotnie niższa niż prędkość zmierzona w przypadku 1. W przypadku pozostałych badanych parametrów wpływ ten był jeszcze bardziej zauważalny.

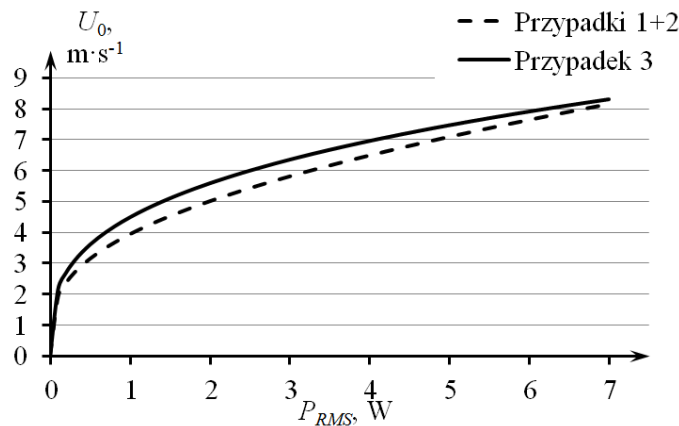
Najistotniejszy wpływ zamknięta komora miała na sprawność elektryczną η siłownika strumieni syntetyzowanych liczona ze wzoru (2.27). Zgodnie ze wzorem sprawność η siłownika jest odwrotnie proporcjonalna do mocy czynnej zasilania P_{RMS} , wprost proporcjonalna do trzeciej potęgi prędkości strumieni syntetyzowanych U_0 oraz zależy od gęstości medium roboczego ρ i pola przekroju dyszy siłownika S_n . Dwa pierwsze parametry są zmienne, natomiast pozostałe dwa nie ulegają zmianie podczas eksperymentu.

Zgodnie z zależnością (2.27) sprawność siłownika η powinna maleć wraz ze wzrostem mocy czynnej P_{RMS} prądu zasilającego, co zgadza się z badaniami przedstawionymi między innymi w [33, 67, 90] oraz wynikami przedstawionym na rys. 4.8c dla przypadków 1 oraz 3. W przypadku 2 sprawność siłownika η rośnie wraz z mocą P_{RMS} . Oznacza to, że wartość mocy elektrycznej P_{RMS} siłownika rośnie wolniej niż prędkość strumieni syntetyzowanych U_0 . Efekt ten jest odwrotny do założonego.

W rozdziale 4.1.1 zauważono, że wraz ze wzrostem amplitudy pracy membrany głośnika (odpowiadającej w analizie wartości Δl) w siłowniku siła „reakcji” zamkniętej komory będzie rosła (rys. 4.6). Założono więc, że wraz ze wzrostem mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika praca membrany będzie coraz mniej efektywna. Zatem sprawność η siłownika w przypadku 2 powinna maleć wraz ze wzrostem mocy czynnej P_{RMS} . Wykazano natomiast, że zamknięta komora ma większy wpływ na pracę membrany przy małych przemieszczeniach membrany (małe wartości mocy czynnej P_{RMS}), a jej wpływ maleje wraz ze wzrostem amplitudy przemieszczenia membrany (wzrostem mocy czynnej P_{RMS}). Jednakże sprawność η siłownika w przypadku 1 nadal jest ponad 31-krotnie wyższa niż w przypadku 2 i wynosi 0,47% przy mocy czynnej $P_{RMS} = 7$ W.

Siłownik w przypadku 3 generował strumienie o najwyższej prędkości U_0 i charakteryzował się najwyższą sprawnością η . Należy nadmienić, że prędkość strumieni U_0 , moment pędu M_0 , energia kinetyczna E_0 i sprawność siłownika η w przypadku 3 była wyższa niż prosta suma arytmetyczna danego parametru dla przypadków 1 oraz 2. Na rys. 4.9 przedstawiono porównanie prędkości strumieni syntetyzowanych $U_{0,3}$ dla przypadku 3 z prędkością $U_{0,1+2}$ rozumianą jako prosta suma arytmetyczna prędkości $U_{0,1}$ dla przypadku 1 oraz $U_{0,2}$ dla przypadku 2 (dodatkowe

oznaczenie w indeksach wprowadzono w celu zachowania jasności przekazu).



Rys. 4.9. Porównanie funkcji $U_{0,3}(P_{RMS})$ dla przypadku 3 z sumą arytmetyczną funkcji $U_{0,1+2}(P_{RMS})=U_{0,1}(P_{RMS}) + U_{0,2}(P_{RMS})$ dla przypadków 1 i 2

Zastosowanie siłownika strumieni syntetyzowanych wydaje się więc uzasadnione. W przypadku gdy prędkość strumieni syntetyzowanych dla siłownika z dwoma elementami wykonawczymi byłaby niższa lub równa sumie arytmetycznej prędkości strumieni syntetyzowanych generowanych przez dwa siłowniki (przypadki 1 oraz 2), należałoby rozważyć korzystanie z dwóch współpracujących siłowników, jednego siłownika z innym elementem wykonawczym albo zastosowanie innego typu siłownika.

Sprawność siłownika η w przypadku 3 jest znacząco większa niż w przypadku 1, nawet o 0,66 punktu procentowego dla $P_{RMS} = 7$ W (prawie dwukrotny wzrost co do wartości). Oznacza to, że stosowanie siłowników z dwoma elementami wykonawczymi jest energetycznie korzystne.

Stosowanie siłownika z dwoma elementami wykonawczymi jest korzystne pod względem energetycznym, natomiast sprawność η oraz analizowane parametry strumieni są wysokie w porównaniu z innymi badaniami.

W pracy [39] autorzy prezentują jednoelementowe, akustyczne, osiowosymetryczne siłowniki (przy różnym kształcie dyszy), które dla mocy zasilania $P = 0,11$ W (w pracy nie sprecyzowano, czy jest to moc czynna) generują strumienie o prędkości charakterystycznej $U_0 = 3,4$ m·s⁻¹, strumieniu pędu $M_0 = 2,8 \cdot 10^{-3}$ N oraz natężeniu przepływu $Q_0 = 2,7 \cdot 10^{-4}$ m³·s⁻¹ (w pracy przedstawiono również siłownik generujący strumienie o wyższych parametrach, jednakże sposób obliczenia pola przekroju dyszy w tym przypadku jest niejednoznaczny). Badany siłownik z dwoma elementami wykonawczymi, dla tej samej mocy, generuje strumienie o parametrach $U_0 = 2,16$ m·s⁻¹, $M_0 = 1,29 \cdot 10^{-3}$ N i $Q_0 = 4,99 \cdot 10^{-4}$ m³·s⁻¹

(podane parametry obliczono na podstawie aproksymacji). Pole przekroju poprzecznego dyszy w przypadku siłownika z pracy [39] jest ponadto 2,94 razy mniejsze niż pole badanego siłownika.

W tym przypadku wartości prędkości charakterystycznej U_0 i strumienia pędu M_0 nie mogą służyć do porównania siłowników, ponieważ mają one dysze o innych wartościach pola przekroju poprzecznego. Jednak w przypadku siłownika z dwoma membranami natężenie przepływu Q_0 jest o 84% większe.

Sprawność siłownika η jest stosunkowo niska. W pracy [89] badano siedem różnych akustycznych, osiowosymetrycznych siłowników strumieni syntetyzowanych. Sprawność elektryczna η siłowników przy częstotliwości rezonansowej (naturalnej, albo Helmholtza) i mocy czynnej zasilania $P_{RMS} = 0,6 \div 1,4$ W wahała się w zakresie $\eta = 1,5 \div 5\%$ w zależności od wymiarów geometrycznych dyszy (średnica, długość) lub komory (wysokość) siłownika. Badany siłownik z dwoma elementami wykonawczymi osiągał sprawność na poziomie $\eta = 1,2\%$. Ma to związek ze nieodpowiednim zaprojektowaniem siłownika i ograniczeniami jego wymiarów, które są związane z jego zastosowaniem. Należy nadmienić, że w pracy [55] wykazano, że poprzez optymalizację wymiarów dyszy siłownika możliwe jest osiągnięcie sprawności η siłownika na poziomie $\eta = 15\%$.

Trzeba zaznaczyć, że w przytoczonych pracach i w czasie badań stosowano głośniki o różnych parametrach roboczych i wymiarach. Rodzaj stosowanych elementów wykonawczych miał istotny wpływ na sprawność siłownika i parametry generowanych strumieni.

4.1.4 Podsumowanie

W podrozdziale 4.1 przedstawiono badania siłownika akustycznego stosowanego w dyszy osiowosymetrycznej. Siłownik pracował w trzech konfiguracjach: z jedną membraną, z jedną membraną i zamkniętą komorą, z dwoma membranami. Przedstawiono model fizyczny i obliczono, jak zamknięta komora znajdująca się za membraną wpływa na jego pracę.

Zbadano prędkość generowanych strumieni w trzech konfiguracjach pracy siłownika oraz porównano otrzymane wyniki. Wykazano, że zastosowanie siłownika z dwoma elementami wykonawczymi jest korzystne pod względem energetycznym.

Sprawność siłownika z dwoma membranami jest prawie dwukrotnie wyższa niż sprawność siłownika z jedną membraną bez zamkniętej komory. Pomimo to wykazano, że w stosunku do akustycznych siłowników z jednym elementem wykonawczym, analizy działania których można znaleźć w literaturze, badany siłownik charakteryzuje się niską sprawnością.

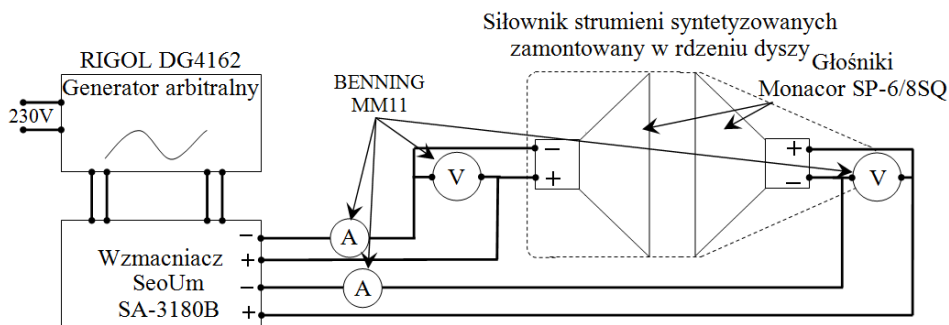
Polepszenie parametrów generowanych strumieni można by osiągnąć poprzez przeprojektowanie siłownika lub zmianę elementów wykonawczych (głośników).

4.2 Charakterystyka siłownika a przesunięcie fazowe

Podstawowym sposobem zmiany prędkości generowanych strumieni syntetyzowanych jest regulacja mocy prądu elektrycznego zasilającego siłownik. Jest to metoda stosunkowo prosta do zrealizowania, jednak dająca niewielkie możliwości gdy wystąpi konieczność zmiany prędkości o małe wartości.

W przypadku siłowników z dwoma elementami wykonawczymi pojawia się dodatkowo możliwość regulacji poprzez zasilanie jednej z membran napięciem o przebiegu sinusoidalnym przesuniętym w fazie w stosunku do napięcia zasilającego drugą membranę. Takie przesunięcie nazwano dalej przesunięciem fazowym α – wyraża się je w stopniach. Jako przesunięcie $\alpha = 0^\circ$ rozumie się sytuację, gdy membrany pracują zgodnie w fazie, tzn. jednocześnie wykonują ruch w tę samą stronę względem obudowy głośnika np. obydwie membrany wysuwają się, zmniejszając objętość komory siłownika. Jako przesunięcie $\alpha = 180^\circ$ rozumie się natomiast sytuację, gdy membrany pracują w fazie przeciwnej, tzn. wykonują ruch w przeciwną stronę względem obudowy głośnika, np. jedna membrana wysuwa się, zmniejszając objętość komory siłownika, a druga cofa się, zwiększając objętość komory. Gdyby obydwie membrany wykonywały ten sam ruch przy przesunięciu $\alpha = 180^\circ$ objętość komory siłownika pozostawałaby taka sama.

W związku z koniecznością zasilania głośników prądem o takim samym przebiegu, ale przesuniętym w fazie względem siebie, układ przedstawiony na rys. 4.2 przebudowano zgodnie z rys. 4.10. Głośniki zasilano prądem o takim samym przebiegu oraz mocy czynnej, której pomiar odbywał się metodą techniczną z poprawnie mierzonym napięciem. W tym celu wykorzystano cztery multimetry Benning M11. Pomiar przesunięcia fazowego pomiędzy prądem a napięciem odbył się z wykorzystaniem oscyloskopu, który w czasie pomiarów prędkości został odłączony od układu, aby nie wprowadzać dodatkowych zaburzeń. Sygnał do układu doprowadzano z wykorzystaniem arbitralnego generatora funkcji Rigol DG4162 podłączonego do wzmacniacza SeoUm SA-3180B. Obydwa urządzenia miały dwa kanały pracujące niezależnie od siebie. Stosowany generator funkcji umożliwił nastawę przesunięcia fazowego między kanałami z dokładnością do 1° .



Rys. 4.10. Schemat układu zasilania głośników prądem o różnym przebiegu

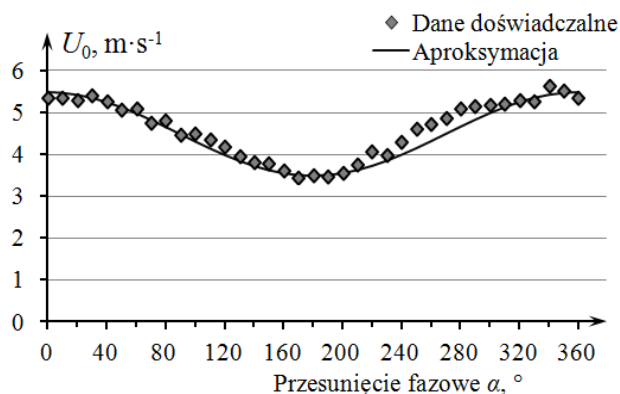
W czasie eksperymentów zmierzona wpływ przesunięcia fazowego na prędkość charakterystyczną U_0 strumieni syntetyzowanych oraz prędkość maksymalną U_{MAX} . Parametry wyznaczono w funkcji mocy czynnej P_{RMS} .

4.2.1 Wyniki eksperymentu

Na rys. 4.11 przedstawiono wykres wpływu przesunięcia fazowego α na prędkość charakterystyczną U_0 . Pomiary dokonano przy mocy czynnej zasilającej siłownik $P_{RMS} = 2$ W. Dodatkowo na wykresie zaznaczono krzywą aproksymacji sinusoidalnej otrzymanych danych.

Zgodnie z oczekiwaniami największą wartość prędkości charakterystycznej U_0 otrzymano dla przesunięcia fazowego $\alpha = 0^\circ$ oraz $\alpha = 360^\circ$ – membrany głośników pracują w tej samej fazie. Natomiast najniższe dla $\alpha = 180^\circ$ – membrany pracują w fazie „przeciwnej”. Wartości prędkości charakterystycznej U_0 przy przesunięciu fazowym $\alpha_1 = 0 \div 180^\circ$ odpowiadają co do wartości wynikom otrzymanym dla $\alpha_2 = 180 \div 360^\circ$:

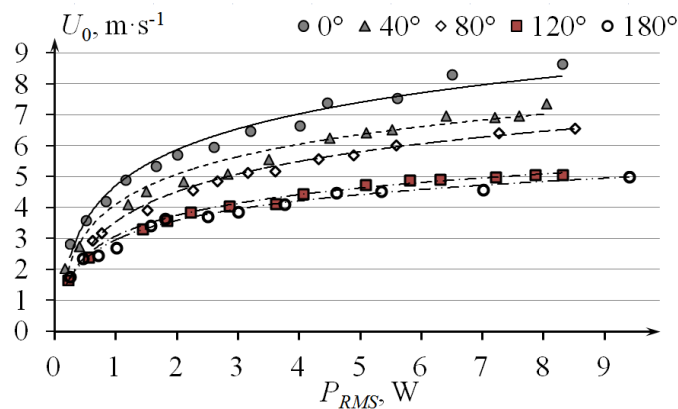
$$U_0(\alpha_1) = U_0(\alpha_2), \text{ dla } \alpha_1 = 360^\circ - \alpha_2 \quad (4.9)$$



Rys. 4.11. Prędkość charakterystyczna U_0 w funkcji przesunięcia fazowego α prądu zasilającego membrany, dla mocy czynnej siłownika $P_{RMS} = 2$ W

W związku z tym w dalszej części rozpatrzono jedynie przesunięcie fazowe w zakresie $\alpha = 0 \div 180^\circ$.

Wybrane zależności prędkości charakterystycznej U_0 w funkcji mocy czynnej prądu zasilającego P_{RMS} dla różnych wartości przesunięcia fazowego α przedstawiono na rys. 4.12. Na rysunku zaznaczono dodatkowo krzywe aproksymacyjne nieopisane na wykresie. Najwyższe wartości prędkości U_0 uzyskano dla przesunięcia fazowego $\alpha = 0^\circ$, natomiast najniższe – dla $\alpha = 180^\circ$. Uzyskane charakterystyki są podobne i zgodne z danymi przedstawionymi na rys. 4.11.



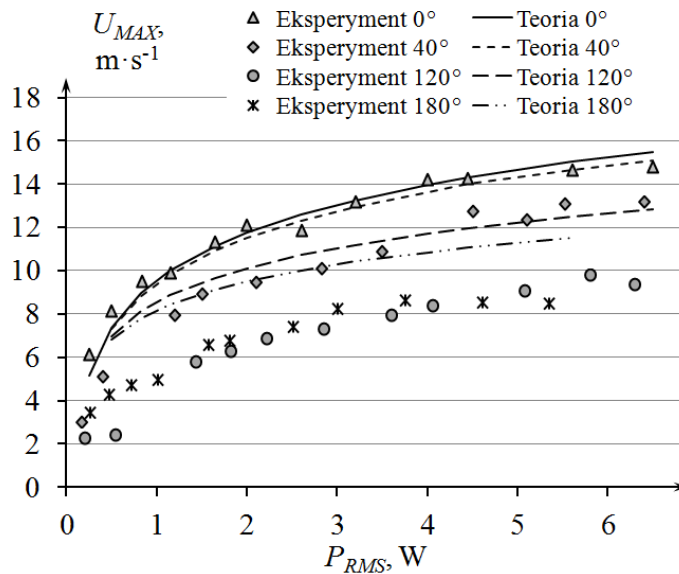
Rys. 4.12. Prędkość charakterystyczna U_0 strumieni syntetyzowanych w funkcji mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika dla różnych przesunięć fazowych α

Na rys. 4.13 przedstawiono maksymalne wartości prędkości U_{MAX} strumienia wydmuchiwanego. Wartości maksymalne zaznaczone jako „eksperyment” to dane eksperymentalne. Natomiast wartości określone jako „teoria” zostały obliczone na podstawie danych przedstawionych na rys. 4.7, w związku z czym jako maksymalną moc czynną przyjęto $P_{RMS} = 7$ W.

Dane teoretyczne wyznaczono w następujący sposób: określono wartości U_{MAX} dla przypadku 1 ($U_{MAX,1}$) oraz przypadku 2 ($U_{MAX,2}$). Wartość U_{MAX} obliczono jako średnią z co najmniej sześciu maksymalnych wartości prędkości w czasie wydmuchu. Następnie na ich podstawie wyznaczono amplitudę U_{MAX} sumy sygnałów sinusoidalnych o amplitudach $U_{MAX,1}$ oraz $U_{MAX,2}$ i przesunięciu fazowym α . Przedstawione działanie można przedstawić następującym wzorem:

$$U_{MAX} \sin(2\pi f \cdot t) = U_{MAX,1} \sin(2\pi f \cdot t) + U_{MAX,2} \sin(2\pi f \cdot t + \alpha) \quad (4.10)$$

Na podstawie tak obliczonych wartości U_{MAX} wykreślono krzywe przedstawione na rys. 4.13.



Rys. 4.13. Wartości prędkości maksymalnej U_{MAX} w czasie wydmuchu strumienia na podstawie pomiarów oraz obliczeń teoretycznych dla różnych przesunięć fazowych α

Krzywa teoretyczna oraz dane eksperymentalne dla $\alpha = 0^\circ$ są ze sobą zgodne. Wraz ze wzrostem przesunięcia fazowego prądu zasilającego siłowniki zwiększa się różnica pomiędzy eksperymentem a obliczeniami teoretycznymi. Najniższe wartości prędkości U_{MAX} otrzymano dla przesunięcia fazowego $\alpha = 180^\circ$.

4.2.2 Analiza badań

Zmiana prędkości strumieni syntetyzowanych U_0 za pomocą sterowania przesunięciem fazowym α napięć zasilających elementy wykonawcze siłownika jest możliwa. Zakres zmiany prędkości jest zależny od mocy zasilania siłownika, natomiast przykładowy przebieg prędkości U_0 w funkcji przesunięcia fazowego α przedstawiono na rys. 4.11. W tym przypadku dla mocy prądu zasilającego $P_{RMS} = 2$ W, prędkość zmienia się w zakresie $3,45 \div 5,62$ m·s⁻¹. Dla mocy zasilania $P_{RMS} = 0,25$ W prędkość można zmieniać w zakresie $1,77 \div 2,82$ m·s⁻¹, natomiast w przypadku mocy zasilania $P_{RMS} = 7$ W prędkością można sterować w zakresie $4,60 \div 8,30$ m·s⁻¹ (rys. 4.12).

Zmiana wartości przesunięcia fazowego α o wartość 10° zmieniła prędkość charakterystyczną strumieni syntetyzowanych U_0 o wartość od $\Delta U_0 = 0,01$ m·s⁻¹ (w przypadku zmiany z $\alpha = 0^\circ$ na $\alpha = 10^\circ$) do $\Delta U_0 = 0,34$ m·s⁻¹ (przypadku zmiany z $\alpha = 60^\circ$ na $\alpha = 70^\circ$). Wartość średnia zmiany

prędkości charakterystycznej podczas zmiany wartości przesunięcia fazowego α o wartość 10° wynosiła $\Delta \bar{U}_0 = 0,14 \pm 0,11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Należy jednak zwrócić uwagę na znaczny spadek prędkości maksymalnej U_{MAX} podczas zwiększania wartości przesunięcia fazowego α . Pomimo że sposób obliczenia wartości teoretycznej prędkości maksymalnej U_{MAX} jest znacznie uproszczony i może wydawać się niewystarczająco dokładny, to różnica między wartością teoretyczną, a otrzymaną na podstawie pomiarów jest bardzo duża.

W związku z powyższym należy zastanowić się, czy sterowanie prędkością w ten sposób pozwoli na uzyskanie podobnych efektów jak w przypadku zmiany mocy siłownika strumieni syntetyzowanych. Gwałtowny spadek prędkości maksymalnej może negatywnie wpłynąć na proces sterowania strumieniem głównym. Potwierdzenie tej hipotezy wymagałoby dodatkowych badań, a zdaniem autora najkorzystniejsza w tym celu byłaby wizualizacja strumieni syntetyzowanych i porównanie strumieni o tych samych prędkościach średnich U_0 w przypadku normalnym (elementy wykonawcze pracują w tej samej fazie, $\alpha = 0^\circ$) oraz w przypadku przesunięcia fazowego $\alpha > 0^\circ$.

4.2.3 Podsumowanie

Wykazano, że istnieje możliwość sterowania prędkością strumieni syntetyzowanych poprzez zmianę przesunięcia fazowego w prądzie zasilającym elementy wykonawcze siłownika strumieni syntetyzowanych.

Na podstawie badań stwierdzono, że prędkość charakterystyczna strumieni syntetyzowanych może być zmieniana w zakresie zależnym od mocy czynnej zasilania siłownika o niewielkie wartości. Tymczasem sterowanie kątem przesunięcia fazowego pracy elementów wykonawczych jest procesem prostym i łatwiejszym w realizacji niż zmiana mocy czynnej prądu elektrycznego zasilającego siłownik.

Zmiana fazy pracy elementów wykonawczych siłownika negatywnie wpłynęła na wartość prędkości maksymalnej strumieni syntetyzowanych. W związku z tym zachodzi obawa w kwestii możliwości wykorzystania strumieni syntetyzowanych w roli strumienia sterującego.

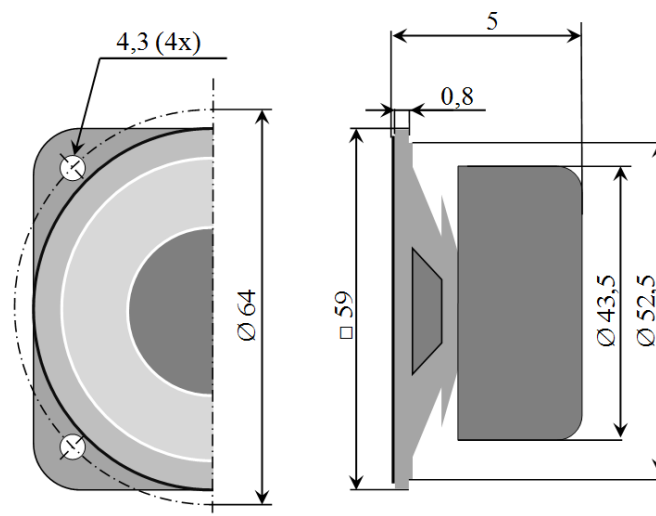
Z uwagi na przedstawione fakty w czasie badań zrezygnowano z wykorzystania przesunięcia fazowego do sterowania prędkością strumieni syntetyzowanych.

4.3 Parametry akustycznych siłowników strumieni syntetyzowanych z dwoma elementami wykonawczymi

Podczas prezentowanych dotychczas badań analizowano dwuelementowe siłowniki strumieni syntetyzowanych stosowane w dyszy osiowosymetrycznej przedstawionej na rys. 2.7. W związku z tym należy

przeprowadzić szersze badania siłowników dwuelementowych, które pozwoliłyby określić zależności między wymiarami geometrycznymi siłownika a parametrami strumieni syntetyzowanych oraz porównać je z siłownikami jednoelementowymi.

W związku z tym zaprojektowano pięć siłowników syntetyzowanych o różnych wymiarach korpusu, których elementami wykonawczymi są głośniki uniwersalne SP-6/4SQS firmy Monacor International o mocy znamionowej $P_{RMS} = 3$ W, impedancji 4Ω , ekranowane magnetycznie. Wymiary głośnika przedstawiono na rys. 4.14.



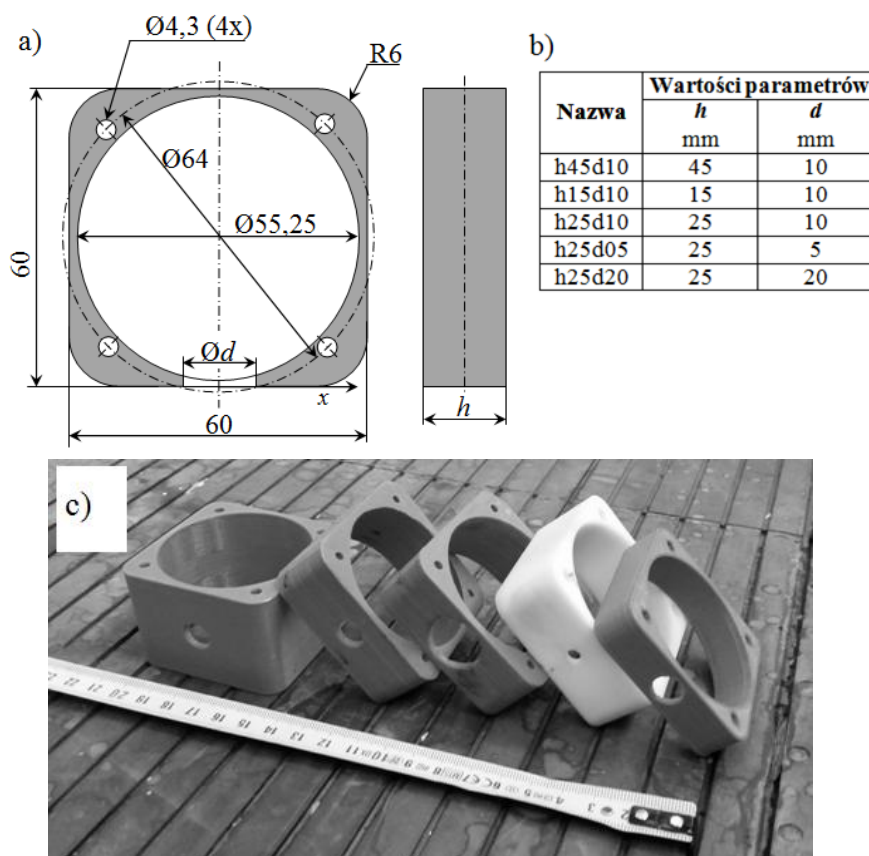
Rys. 4.14. Wymiary geometryczne głośnika SP-6/4SQS firmy Monacor International

Parametrami zmiennymi zaprojektowanych korpusów są: średnica dyszy d oraz wysokość h korpusu rozumiana jako odległość pomiędzy elementami wykonawczymi siłownika strumieni syntetyzowanych. Korpusy zaprojektowanych siłowników strumieni syntetyzowanych wraz z wartościami średnic dyszy d oraz wysokości h korpusów siłowników strumieni syntetyzowanych przedstawiono na rys. 4.15a oraz b. Korpusy siłowników wykonano metodą druku 3D z zastosowaniem poliaktydu (PLA). Korpusy obrobiono w taki sposób, aby stępić ostre krawędzie. Zdjęcie wykonanych korpusów przedstawiono na rys. 4.15c.

Należy podkreślić, że w związku ze konstrukcją siłowników głębokość dyszy nie jest wartością stałą i zmienia się wraz z wzrostem odległości od osi dyszy. W czasie badań nie rozpatrywano wpływu wysokości dyszy na generowane strumienie syntetyzowane.

Głośniki przymocowano do korpusów za pomocą śrub, a miejsce styku głośnik – korpus uszczelniono dodatkowo taśmą przeznaczoną do

uszczelniania kanałów wentylacyjnych. Tak wykonany siłownik podłączono do zasilania analogicznie do schematu przedstawionego na rys. 4.2. Pomiar prędkości odbywał się w odległości 2 mm od dyszy siłownika wzdłuż osi x zaznaczonej na rys. 4.15a.



Rys. 4.15. Rysunek korpusu dwuelementowego siłownika strumieni syntetyzowanych wraz z wymiarami (a), tabela z wyszczególnionymi wymiarami oraz nazwami zaprojektowanych siłowników strumieni syntetyzowanych (b), zdjęcia wykonanych korpusów siłowników strumieni syntetyzowanych (c)

Należy zaznaczyć, że rozkład prędkości w dyszy siłownika może nie być osiowosymetryczny, w szczególności w przypadku siłownika h25d20, w związku z niewielką odległością krawędzi dyszy od elementu wykonawczego (zjawisko to nie występuje w przypadku klasycznych jednoelementowych siłowników). Jednak w celu uproszczenia pomiarów przyjęto, że rozkład prędkości w dyszy jest osiowosymetryczny, a prędkość charakterystyczną wyznaczono na podstawie pomiarów prędkości wzdłuż osi x , na której odległość od obydwu elementów wykonawczych jest taka sama.

W czasie pomiarów przyjęto stałą moc czynną prądu zasilającego strumienie syntetyzowane $P_{RMS} = 2 \text{ W} \pm 3\%$, natomiast częstotliwość prądu zasilającego zmieniano w zakresie $10 \div 1000 \text{ Hz}$ ze stałym skokiem 10 Hz .

4.3.1 Wyniki eksperymentu

Na rys. 4.16 przedstawiono prędkość charakterystyczną U_0 strumieni syntetyzowanych w funkcji częstotliwości prądu f zasilającego siłownik. Na podstawie wykresów można określić częstotliwości charakterystyczne (częstotliwość naturalną f_n oraz częstotliwość Helmholtza f_H) siłowników. Wartości częstotliwości charakterystycznych zebrano w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Zestawienie częstotliwości charakterystycznych dla badanych siłowników

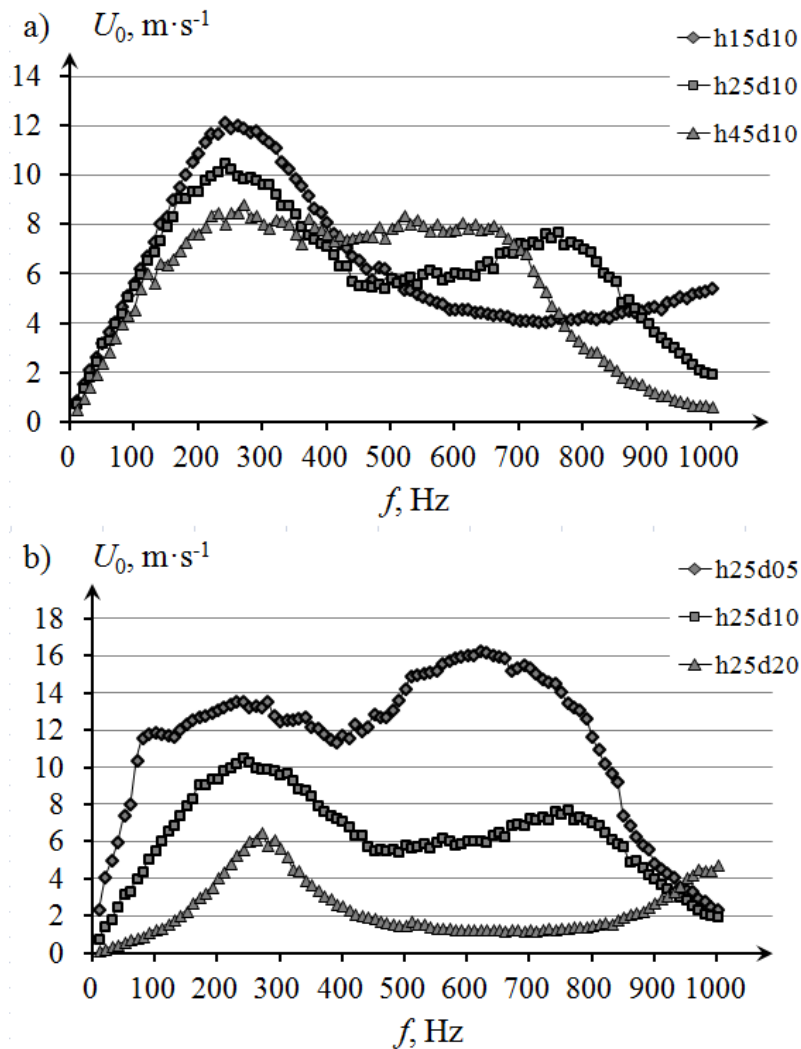
Nazwa	Częstotliwość naturalna f_n , Hz	Częstotliwość Helmholtza f_H , Hz
h15d10	240	–
h25d05	240	620
h25d10	240	760
h25d20	270	–
h45d10	270	520

W przypadku siłowników o stałej średnicy dyszy d najwyższe wartości prędkości U_0 otrzymano dla siłownika h15d20, $U_0 = 12,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $f = 240 \text{ Hz}$. Najniższe wartości prędkości U_0 przy częstotliwości rezonansowej uzyskano dla siłownika h45d10 $U_0 = 8,87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $f = 270 \text{ Hz}$.

Dla wszystkich siłowników o stałej wartości średnicy dyszy d (siłowniki h15d10, h25d10, h45d10) prędkość była najwyższa w przypadku częstotliwości naturalnej f_n . Częstotliwość Helmholtza f_H dla siłownika h15d10 mieści się poza zakresem pomiarowym, a więc $f_H > 1000 \text{ Hz}$.

Wartość prędkości charakterystycznej U_0 strumieni syntetyzowanych dla siłownika h45d10 dla częstotliwości, prądu zasilającego, w zakresie $f_n < f < f_H$ zmienia się w niewielkim zakresie $U_0 = 7,28 \div 8,87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ w stosunku do wartości prędkości U_0 strumieni generowanych przez inne siłowniki.

W przypadku siłowników o stałej wartości odległości między elementami wykonawczymi h najwyższe wartości prędkości U_0 otrzymano dla siłownika h25d05, $U_0 = 16,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $f = 620 \text{ Hz}$. Najniższe wartości prędkości U_0 przy częstotliwości rezonansowej uzyskano dla siłownika h25d20, $U_0 = 6,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $f = 270 \text{ Hz}$.



Rys. 4.16. Prędkość charakterystyczna U_0 strumieni syntetyzowanych generowanych przez siłowniki o tej samej: (a) średnicy dyszy d oraz (b) odległości między elementami wykonawczymi h w funkcji częstotliwości prądu zasilającego f dla stałej wartości mocy czynnej prądu elektrycznego zasilającego siłownik $P_{RMS} = 2 \text{ W}$

W przypadku siłownika $h25d05$ najwyższą wartość prędkości $U_0 = 16,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ otrzymano dla częstotliwości prądu zasilającego odpowiadającej częstotliwości Helmholtza $f_H = 620 \text{ Hz}$. Dla siłownika $h25d10$ najwyższą wartość prędkości $U_0 = 10,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ otrzymano dla częstotliwości prądu zasilającego odpowiadającej częstotliwości naturalnej $f_n = 240 \text{ Hz}$.

W przypadku siłownika h25d20 najwyższą wartość prędkości odnotowano dla $U_0 = 6,53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ otrzymaną dla częstotliwości prądu zasilającego odpowiadającej częstotliwości naturalnej $f_n = 270 \text{ Hz}$. Częstotliwość Helmholtza jest wyższa niż zakres rozpatrywanej częstotliwości prądu zasilającego f . Najwyższą wartość prędkości U_0 odnotowana dla częstotliwości prądu zasilającego $f > 500 \text{ Hz}$, $U_0 = 4,76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $f = 1000 \text{ Hz}$

Na rys. 4.17 przedstawiono zależność liczby Reynoldsa Re w funkcji częstotliwości prądu zasilającego f dla siłowników o stałej średnicy dyszy d (rys. 4.17a) oraz stałej odległości pomiędzy elementami wykonawczymi h (rys. 4.17b).

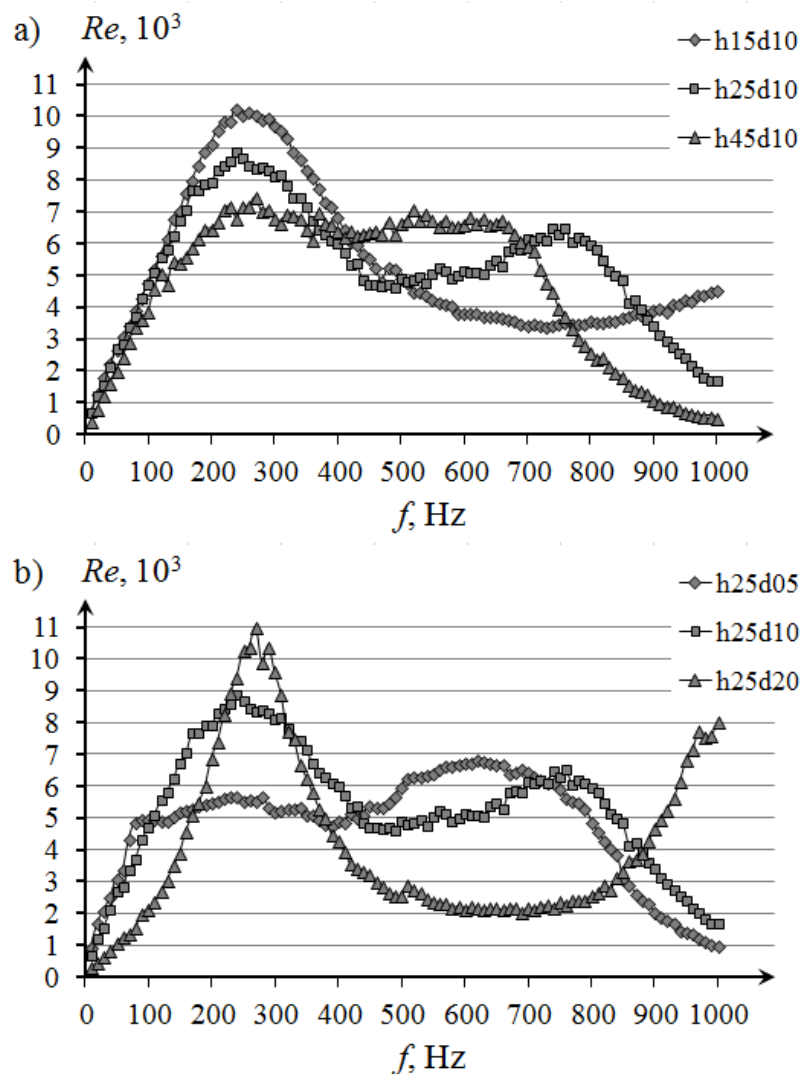
W przypadku siłowników o stałej wartości średnicy dyszy d najwyższe wartości liczby Reynoldsa Re otrzymano w przypadku siłownika: h15d10 – $Re = 10240$ dla $f = 240 \text{ Hz}$; h25d10 – $Re = 8876$ dla $f = 240 \text{ Hz}$; h45d10 – $Re = 7480$ dla $f = 270 \text{ Hz}$.

W przypadku siłowników o stałej wartości odległości h pomiędzy elementami wykonawczymi najwyższą wartość liczby Reynoldsa Re otrzymano dla siłownika h25d20 $Re = 11009$ dla $f = 270 \text{ Hz}$. Dla częstotliwości prądu zasilającego $f = 1000 \text{ Hz}$ otrzymano wartość liczby Reynoldsa $Re = 8034$. W przypadku siłownika h25d10 najwyższa wartość liczby Reynoldsa wynosiła $Re = 8876$ dla $f = 240 \text{ Hz}$, natomiast w przypadku siłownik h25d05 – $Re = 6852$ dla $f = 620 \text{ Hz}$

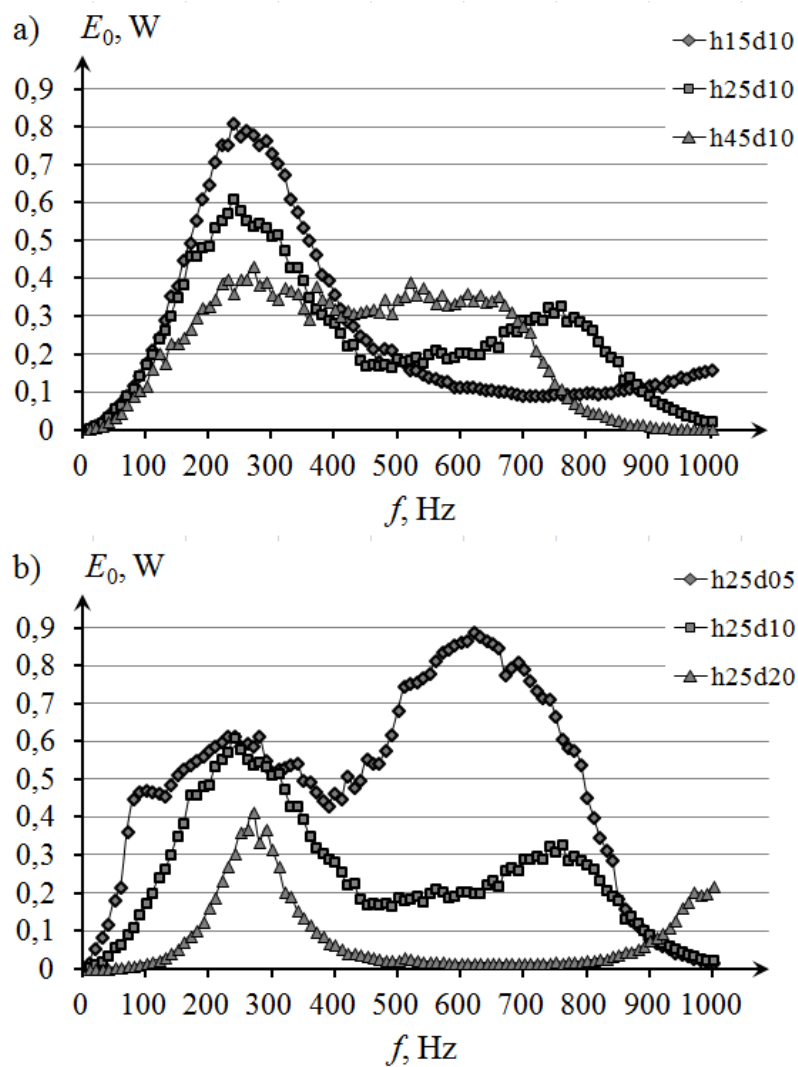
Na rys. 4.18 przedstawiono wykresy energii kinetycznej E_0 strumieni syntetyzowanych generowanych przez badane siłowniki w przypadku siłowników o stałej wartości średnicy dyszy d (rys. 4.18a) oraz stałej wartości odległości pomiędzy elementami wykonawczymi h (rys. 4.18b). Najwyższe wartości strumienia energii kinetycznej E_0 , w przypadku siłowników o stałej wartości średnicy dyszy d , otrzymano dla siłownika h15d10 $E_0 = 0,81 \text{ W}$ dla $f = 240 \text{ Hz}$. Najwyższa wartość strumienia energii kinetycznej E_0 dla siłownika h25d10 wynosiła $E_0 = 0,61 \text{ W}$ dla $f = 240 \text{ Hz}$, natomiast dla siłownika h45d10 – $E_0 = 0,43 \text{ W}$ dla $f = 270 \text{ Hz}$.

W przypadku siłowników o stałej wartości odległości między elementami wykonawczymi h najwyższe wartości otrzymano: dla siłownika h25d05 – $E_0 = 0,89 \text{ J}$ dla $f = 620 \text{ Hz}$; dla siłownika h25d10 – $E_0 = 0,61 \text{ W}$ dla $f = 240 \text{ Hz}$; dla siłownika h25d20 – $E_0 = 0,42 \text{ W}$ dla $f = 270 \text{ Hz}$.

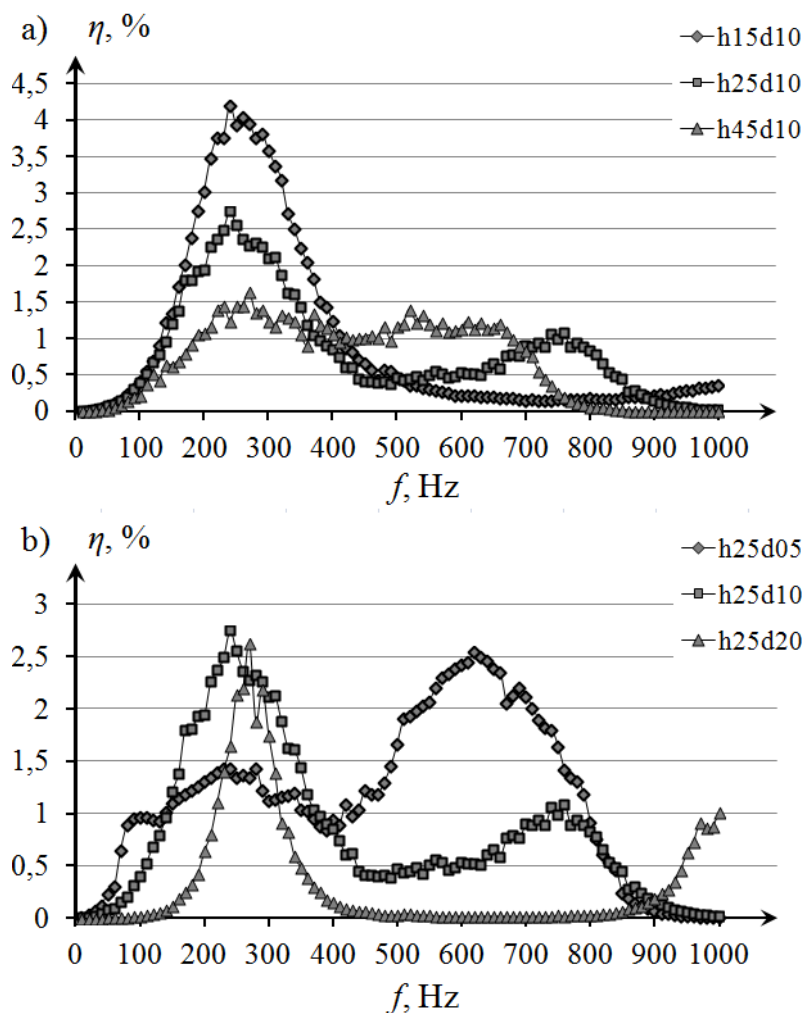
Na rys. 4.19 przedstawiono wartość sprawności η w zależności od częstotliwości f prądu zasilającego siłownik. Najwyższą wartość sprawności η uzyskano dla siłownika h15d10, $\eta = 4,19\%$ dla $f = 240 \text{ Hz}$. W przypadku innych siłowników osiągnięto wartości: h25d10 – $\eta = 2,75\%$ dla $f = 240 \text{ Hz}$; h45d10 – $\eta = 1,63\%$ dla $f = 270 \text{ Hz}$; h25d05 – $\eta = 2,54\%$ dla $f = 620 \text{ Hz}$; h25d20 – $\eta = 2,62\%$ dla $f = 270 \text{ Hz}$.



Rys. 4.17. Liczba Reynoldsa Re strumieni syntetyzowanych generowanych przez siłowniki o tej samej: (a) średnicy dyszy d oraz (b) odległości między elementami wykonawczymi h w funkcji częstotliwości prądu zasilającego f dla stałej wartości mocy czynnej prądu elektrycznego zasilającego siłownik $P_{RMS} = 2 \text{ W}$



Rys. 4.18. Strumień energii kinetycznej E_0 strumieni syntetyzowanych generowanych przez siłowniki o tej samej: (a) średnicy dyszy d oraz (b) odległości między elementami wykonawczymi h w funkcji częstotliwości prądu zasilającego f dla stałej wartości mocy czynnej prądu elektrycznego zasilającego siłownik $P_{RMS} = 2 \text{ W}$



Rys. 4.19. Sprawność η siłowników strumieni syntetyzowanych o tej samej: (a) średnicy dyszy d oraz (b) odległości między elementami wykonawczymi h w funkcji częstotliwości prądu zasilającego f dla stałej wartości mocy czynnej prądu elektrycznego zasilającego siłownik $P_{RMS} = 2$ W

4.3.2 Analiza badań

Jak wspomniano, pierwsza wartość częstotliwości f prądu zasilającego, dla której prędkość strumieni syntetyzowanych U_0 osiąga wartość maksymalną (lokalne ekstremum), odpowiada wartości częstotliwości naturalnej f_n , która jest zależna od wykorzystanych elementów wykonawczych. W związku z tym wartość ta powinna być stała niezależnie od wymiarów geometrycznych korpusu; dla badanych siłowników wynosi $f_n = 240$ Hz dla siłowników h15d10, h25d10 i h25d05

oraz $f_n = 270$ Hz dla siłowników h45d10 i h25d20. Niewielka różnica pomiędzy tymi wartościami może wynikać z błędów pomiarowych, błędów mocowania głośników do korpusów lub błędów produkcyjnych w wykorzystanych głośnikach.

W tabeli 4.2 zestawiono wartości częstotliwości naturalnych f_n wyznaczone na podstawie pomiarów oraz wzorów teoretycznych. W czasie obliczeń przyjęto parametry głośników określonych jako średnia wartość parametru, obliczona na podstawie trzech wartości wyznaczonych dla trzech różnych głośników SP6/4SQS. Przyjęte wartości wynoszą: $K = 3050$ N·m⁻¹, $m_d = 0,002763$ kg oraz $D = 0,004$ m. Przyjęta długość dyszy wynosi $l_n = 2,5$ mm.

Tabela 4.2. Częstotliwość naturalna f_n wyznaczona na podstawie pomiarów oraz wzorów (2.12), (2.13) oraz (2.14) dla badanych siłowników strumieni syntetyzowanych

Nazwa	Częstotliwość naturalna f_n	Częstotliwość f_n , wg wzoru (2.12)	Częstotliwość f_n , wg wzoru (2.13)	Częstotliwość f_n , wg wzoru (2.14)
	Hz	Hz	Hz	Hz
h15d10	240	167,22	130,20	23,65
h25d05	240	167,22	105,50	11,82
h25d10	240	167,22	130,20	23,65
h25d20	270	167,22	146,77	47,30
h45d10	270	167,22	130,20	23,65

W siłowniku wykorzystano dwie membrany, pracujące w tej samej fazie, dlatego potraktowano je jak jedną membranę o masie m_d oraz polu powierzchni S_{di} równym co do wartości podwojonej wartości danego parametru. Sprężystość zastępcza K_i została wyznaczona dla równoległego połączenia sprężyn. Średnicę zastępczą membrany D_i wyliczono ze wzoru:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}{\pi}} = \sqrt{2} \cdot D \quad (4.11)$$

Należy zauważyć, że zastosowane uproszczenie (traktowanie dwóch membran jako jednej dwukrotnie większej) może wprowadzić znaczny błąd w trakcie obliczeń. W związku z tym dane przedstawione w tabeli 4.2 można traktować jako orientacyjne. Jednak należy zwrócić uwagę na różnice otrzymanych wyników, w szczególności ze wzoru (2.14). Wartości teoretyczne otrzymane ze wzoru (2.14) są nawet 10-krotnie niższe niż wartości częstotliwości charakterystycznej f_n wyznaczone eksperymentalnie. Wartości otrzymane z zastosowaniem wzorów (2.12) oraz (2.13) są około dwukrotnie mniejsze niż wartości wyznaczone

eksperymentalnie. Ponieważ w trakcie analizy literatury nie znaleziono innych wzorów na obliczenie częstotliwości naturalnej f_n , przyjęto, że nie istnieje wzór pozwalający wyznaczyć częstotliwość naturalną f_n dwu- lub wieloelementowego siłownika strumieni syntetyzowanych.

W tabeli 4.3 przedstawiono wartości częstotliwości Helmholtza f_H wyznaczoną na podstawie pomiarów (rys. 4.16) oraz wartość teoretyczną obliczoną na podstawie wzoru (2.15). Wartość teoretyczna okazała się największa w przypadku siłownika h25d20 i wynosiła ok. 1035 Hz. Wartość ta jest wyższa niż badany zakres pomiarowy, co pokrywa się z faktem, iż nie udało się wyznaczyć wartości na podstawie eksperymentu. W przypadku siłownika h15d10 wartość teoretycznej częstotliwości f_H wynosi 882 Hz, jednak pomiary wykazały, że wartość rzeczywista częstotliwości f_H jest wyższa niż 1000 Hz.

W przypadku siłownika h25d05 wartość rzeczywista f_H jest o 43,85% wyższa niż wartość teoretyczna częstotliwości Helmholtza f_H , natomiast w przypadku siłownika h25d10 o 11,27% wyższa, a dla siłownika h14d10 – o 2,16% wyższa.

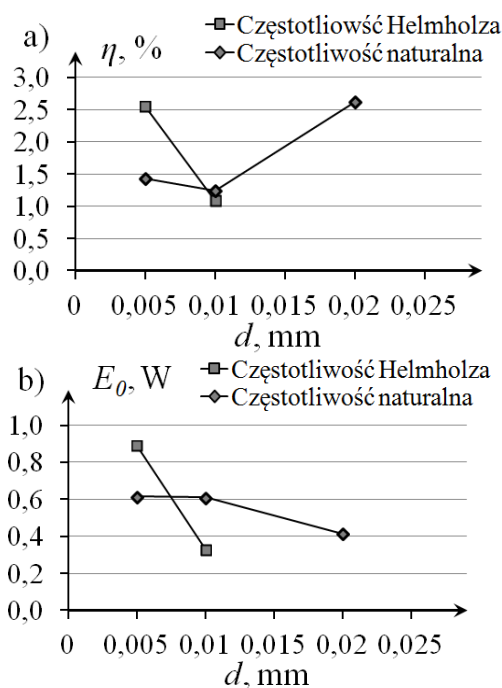
Pomimo że błędy wydają się znaczne, należy zauważyć, że w pracy [90] przedstawiono siedem różnych osiowosymetrycznych jednoelementowych siłowników syntetyzowanych, dla których również wyznaczono częstotliwość Helmholtza f_H w sposób teoretyczny oraz eksperymentalny, błąd pomiędzy wynikami wahał się w granicach 0,01÷39,53 punktu procentowego. Otrzymane różnice w obliczeniach i danych eksperymentalnych dla badanych siłowników należy więc przyjąć za dopuszczalne.

Tabela 4.3. Częstotliwość Helmholtza f_H wyznaczona na podstawie pomiarów oraz wzoru (2.15), współczynnik CR oraz objętość komory V_c siłownika badanych siłowników strumieni syntetyzowanych (wartości pogrubione uwzględniono w czasie obliczeń współczynnika CR)

Nazwa	Częstotliwość Helmholtza f_H	Częstotliwość Helmholtza f_H (wg wzoru (2.15))	Stosunek CR (wg wzoru (2.16))	Objętość komory V_c
	Hz	Hz	-	m ³
h15d10	-	882,06	0,10	2,95E-05
h25d05	620	431,01	0,13	4,91E-05
h25d10	760	683,24	0,08	4,91E-05
h25d20	-	1034,85	0,05	4,91E-05
h45d10	520	509,25	0,10	8,84E-05

Współczynniki CR (tabela 4.3), otrzymane dla wszystkich siłowników, są > 1 , w związku z tym należy spodziewać się, że wartość prędkości strumieni syntetyzowanych generowanych przez siłownik będzie tym wyższa, im mniejsza będzie objętość komory siłownika. Zależność ta jest szczególnie widoczna na rys. 4.16a, na którym wartość prędkości strumieni syntetyzowanych U_0 dla siłownika h15d10, o najniższej wartości współczynnika CR (tabela 4.3), jest wyższa o 15,37% niż wartość prędkości U_0 dla siłownika h25d10 oraz o 36,89% wyższa niż wartość prędkości U_0 dla siłownika h45d10 (dla częstotliwości naturalnej f_n).

Na rys. 4.20 przedstawiono zależność sprawności η (rys. 4.20a) siłownika strumieni syntetyzowanych oraz strumienia energii kinetycznej E_0 (rys. 4.20b) strumieni syntetyzowanych w funkcji średnicy dyszy d siłownika.



Rys. 4.20. Zależność (a) sprawności η siłownika strumieni syntetyzowanych oraz (b) strumień energii kinetycznej E_0 strumieni syntetyzowanych w funkcji średnicy dyszy d , przy stałej wysokości $h = 25$ mm komory siłownika strumieni syntetyzowanych, dla częstotliwości naturalnej f_n oraz częstotliwości Helmholtza f_H

Najwyższą wartość sprawność $\eta = 2,63\%$ uzyskano dla siłownika h25d20 o średnicy dyszy $d = 20$ mm dla częstotliwości naturalnej $f_n = 270$ Hz. Jednakże należy zauważyć, że w tym przypadku uzyskano również niższy strumień energii kinetycznej $E_0 = 0,42$ W niż w przypadku

siłowników o średnicy dyszy $d = 5$ mm oraz $d = 10$ mm, dla częstotliwości zasilania f równej co do wartości częstotliwości naturalnej f_n siłownika.

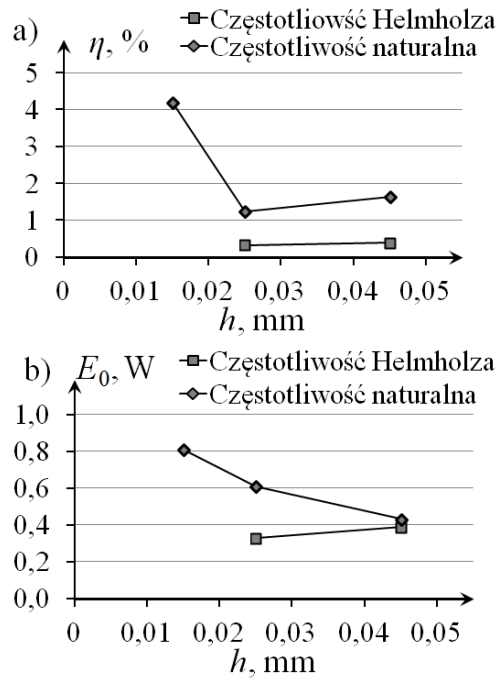
Drugą co do wartości sprawność $\eta = 2,54\%$ oraz najwyższą wartość strumienia energii kinetycznej $E_0 = 0,89$ W uzyskano dla siłownika h25d05 (siłownik o najmniejszej wartości średnicy dyszy $d = 5$ mm) dla częstotliwości zasilania f siłownika równej co do wartości częstotliwości Helmholtza f_H siłownika. Należy zauważyć, że w przypadku siłownika o średnicy dyszy $d = 20$ mm wartość częstotliwości Helmholtza f_H jest wyższa niż zakres badanych wartości częstotliwości prądu zasilającego, przez co dla średnicy dyszy $d = 20$ mm nieznaczono wartości sprawności η siłownika, ani strumienia energii kinetycznej E_0 strumieni syntetyzowanych.

Na rys. 4.21 przedstawiono zależność sprawności η (rys. 4.21a) siłownika strumieni syntetyzowanych oraz strumienia energii kinetycznej E_0 (rys. 4.21b) strumieni syntetyzowanych w funkcji wysokości h siłownika. Najwyższą wartość sprawności $\eta = 4,2\%$ oraz strumienia energii kinetycznej $E_0 = 0,81$ W uzyskano dla wysokości $h = 15$ mm dla częstotliwości naturalnej $f_n = 240$ Hz. Najniższe wartości sprawności siłownika η oraz strumienia energii kinetycznej E_0 uzyskano dla siłowników strumieni syntetyzowanych zasilanych o prądem o częstotliwości f równej co do wartości częstotliwości Helmholtza f_H – dla siłownika o wysokości $h = 25$ mm uzyskano sprawność $\eta = 1,08\%$ oraz strumień energii kinetycznej $E_0 = 0,33$ W.

Uzyskane wartości sprawności η siłowników strumieni syntetyzowanych mieszczą się w przedziale $\eta = 1,08\div 4,2\%$. W związku z tym, że podczas projektowania siłowników nie wykonano obliczeń mających na celu optymalizację jego konstrukcji, wartości te można uznać za zadowalające. Dla porównania w pracy [90], w której przedstawiono wpływ wybranych cech geometrycznych siłowników na parametry generowanych strumieni syntetyzowanych, najwyższa uzyskana wartość sprawności wynosiła $\eta = 4,76\%$. Jednakże, jak wspomniano wcześniej, w pracy [55] wykazano, że poprzez optymalizację rozmiarów dyszy siłownika można zwiększyć znacznie sprawność η siłownika strumieni syntetyzowanych (w badaniach przedstawionych w pracy [55] udało się uzyskać sprawność na poziomie $\eta = 15\%$).

Na podstawie zaprezentowanych analizy można zauważyć, że w przypadku badanych siłowników strumieni syntetyzowanych wyższe parametry strumieni syntetyzowanych uzyskano dla siłowników o najniższych wartościach odległości h oraz średnicy d . Skutkiem zmniejszenia średnicy do wartości $d = 0,5$ mm było uzyskanie, dla częstotliwości Helmholtza f_H , wyższych wartości parametrów strumieni syntetyzowanych i sprawności η siłownika niż dla częstotliwości naturalnej f_n . Zmniejszenie odległości h (zmniejszenie objętości V_c komory roboczej

siłownika) również poskutkowało zwiększeniem wartości parametrów strumieni syntetyzowanych i sprawności η siłownika.



Rys. 4.21. Zależność (a) sprawności η siłownika strumieni syntetyzowanych oraz (b) strumień energii kinetycznej E_0 strumieni syntetyzowanych w funkcji wysokości komory h siłownika strumieni syntetyzowanych, przy stałej średnicy dyszy $d = 10$ mm siłownika, dla częstotliwości naturalnej f_n oraz częstotliwości Helmholtza f_H

4.3.3 Podsumowanie

W podrozdziale przedstawiono badania wpływu wartości wysokości h komory oraz średnicy dyszy d siłownika strumieni syntetyzowanych na sprawność η siłownika oraz wybrane parametry generowanych strumieni syntetyzowanych (prędkość strumieni syntetyzowanych U_0 , liczbę Reynoldsa Re , strumień energii kinetycznej E_0). Badania wykonano w przedziale częstotliwości prądu zasilającego $f = 10 \div 1000$ Hz.

Na podstawie wyznaczonych charakterystyk określono częstotliwość naturalną f_n oraz częstotliwość Helmholtza f_H . Następnie obliczono teoretyczne częstotliwości i porównano z wartościami wyznaczonymi eksperymentalnie. Dla dwóch siłowników nie udało się wyznaczyć częstotliwości Helmholtza f_H , która była wyższa niż zakres badanych częstotliwości f prądu zasilającego siłownik (siłowniki h25d20 oraz h15d10).

Porównanie wartości częstotliwości naturalnej f_n wyznaczonych eksperymentalnie i teoretycznie wykazało, że nie ma modelu matematycznego (w analizowanej literaturze), który mógłby zostać użyty do wyznaczenia częstotliwości naturalnej f_n w przypadku siłowników dwu- lub więcej elementowych.

Dla badanych siłowników wyznaczono współczynnik CR , który dla wszystkich siłowników wynosił $CR > 1$. Na tej podstawie stwierdzono, że dla badanych siłowników prędkość U_0 generowanych strumieni będzie tym wyższa im mniejsza będzie objętość komory roboczej V_c , co zgadzało się z obserwacją. Potwierdziło to, w sposób eksperymentalny, model matematyczny przedstawiony w [61].

Najwyższą wartość sprawności η siłownika strumieni syntetyzowanych osiągnięto dla siłowników:

- h15d10 – $h = h_{min} = 15$ mm; $f = f_n$; $\eta = 4,2\%$;
- h25d20 – $d = d_{max} = 20$ mm; $f = f_n$; $\eta = 2,63\%$;
- h25d05 – $d = d_{min} = 5$ mm; $f = f_H$; $\eta = 2,54\%$.

Najwyższą wartość strumienia energii kinetycznej E_0 strumieni syntetyzowanych osiągnięto dla siłowników:

- h25d05 – $d = d_{min} = 5$ mm; $f = f_H$; $E_0 = 0,89$ W;
- h15d10 – $h = h_{min} = 15$ mm; $f = f_n$; $E_0 = 0,81$ W;
- h25d05 – $d = d_{min} = 5$ mm; $f = f_n$; $E_0 = 0,61$ W;
- h25d10 – $d = 5$ mm; $h = 25$ mm; $f = f_n$; $E_0 = 0,61$ W.

Na podstawie przedstawionych wyników można zauważyć, że niskie wartości wysokości h siłownika oraz średnicy d dyszy korzystnie wpływają na wartość sprawności η siłownika oraz strumienia energii kinetycznej E_0 . Jednakże w badaniach nie rozpatrywano modelu matematycznego siłownika, a badano jedynie wpływ trzech różnych wartości wysokości h oraz średnicy dyszy d na parametry strumieni syntetyzowanych i ich siłownika. W związku z tym należy zaznaczyć, że przedstawione zależności mogą mieć charakter wybiórczy, a znaczna zmiana parametrów h i d względem siebie może negatywnie odbić się na parametrach generowanych strumieni. W celu dokładnego określenia wpływu cech geometrycznych siłownika należałoby utworzyć model matematyczny siłownika i porównać go z wynikami eksperymentu.

4.4 Wnioski dotyczące rozdziału

W powyższym rozdziale przedstawiono badania dotyczące dwuelementowych siłowników strumieni syntetyzowanych. W podrozdziale 4.1 porównano siłowników jedno- oraz dwuelementowych i omówiono wpływ zamkniętej komory znajdującej się za membraną głośnika.

Wykazano, że siłowniki z dwoma elementami wykonawczymi charakteryzują się wyższą wartością sprawności η (dla tej samej mocy czynnej P_{RMS} prądu zasilającego) oraz wyższą wartość prędkości strumieni syntetyzowanych U_0 . Głównym efektem badań było wykazanie słuszności zastosowania siłownika dwuelementowego do generowania strumienia sterującego w dyszy osiowosymetrycznej.

Kolejnym etapem (podrozdział 4.2) było zbadanie możliwości sterowania prędkością strumieni syntetyzowanych U_0 w dwuelementowych siłownikach strumieni syntetyzowanych poprzez zmianę przesunięcia fazowego pomiędzy prądem zasilającym pierwszy i drugi element wykonawczy. Wykazano możliwość takiego sterowania, a wśród jego zalet wymieniono:

- zmianę prędkości U_0 strumieni syntetyzowanych o niewielkie wartości (zakres zależny od mocy czynnej P_{RMS});
- prawidłowość, że zmiana kąta α przesunięcia fazowego prądu zasilającego poszczególne elementy wykonawcze jest możliwa z dużą dokładnością i jest procesem prostszym niż zmiana mocy P_{RMS} zasilania (dla stosowanego układu zasilania siłownika).

Wśród wad znalazły się:

- negatywny wpływ zmiany kąta α przesunięcia fazowego prądu zasilającego poszczególne elementy wykonawcze na maksymalną wartość prędkości U_{MAX} generowanych strumieni;
- niepewność w kwestii postaci/kształtu generowanych strumieni (zaproponowano wizualizację przepływu w celu rozwiania wątpliwości) i ich wpływu na strumień główny.

W związku z powyższym ostatecznie zrezygnowano ze stosowania tej metody (zmiana kąta α przesunięcia fazowego prądu zasilającego poszczególne elementy wykonawcze) w trakcie kolejnych badań.

Ostatnim etapem (podrozdział 4.3) było zaprojektowanie i wykonanie badań pięciu różnych akustycznych, dwuelementowych siłowników strumieni syntetyzowanych o różnych wartościach wysokości komory h oraz średnicy dyszy d (po trzy różne wartości parametrów). Siłowniki zostały przebadane dla zakresu częstotliwości prądu zasilającego $f = 10 \div 1000$ Hz.

Następnie na podstawie analizy danych omówiono wpływ badanych parametrów na generowane strumienie syntetyzowane oraz sprawność η siłownika. Wskazano brak, w analizowanej literaturze, modelu matematycznego opisującego częstotliwość naturalną f_n oraz dowiedziono, że istnieje możliwość stosowania współczynnika CR (wyprowadzonego i

szerzej omówionego w [61]) w trakcie projektowania siłowników dwuelementowych.

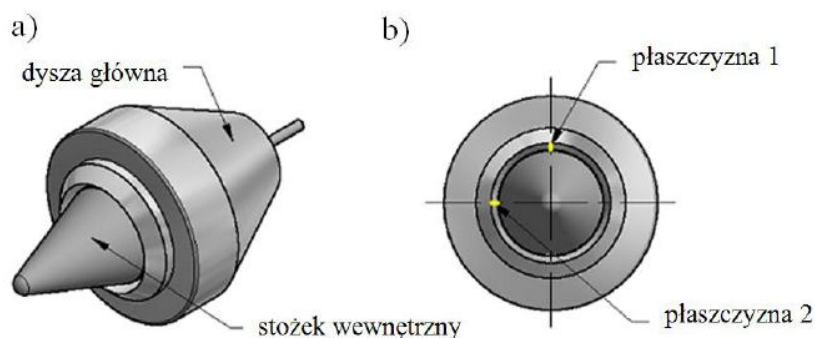
Głównym celem badań było dostarczenie informacji na temat stosowanego w dyszy osiowosymetrycznej siłownika oraz zebranie danych umożliwiających zaprojektowanie nowego siłownika strumieni syntetyzowanych do sterowania strumieniem osiowosymetrycznym. Należy jednak zwrócić uwagę, że w powyższych badaniach nie porównano dwuelementowych siłowników strumieni syntetyzowanych z siłownikami innymi niż klasyczne, np. siłowników bliźniaczymi lub hybrydowymi. W związku z tym przedstawione badania są, zdaniem autora, wystarczające do zaprojektowania nowego siłownika strumieni syntetyzowanych, jednak niewystarczające do zapewnienia, że siłowniki dwuelementowe są najbardziej korzystne w zastosowaniach tego typu (dysza osiowosymetryczna). Cel badań został osiągnięty.

5. STRUMIEŃ OSIOWOSYMETRYCZNY

Głównym celem badań było wykazanie możliwości zastosowania strumieni syntetyzowanych w procesie sterowania strumieniem osiowosymetrycznym, pierścieniowym. W związku z tym ten rozdział poświęcono badaniom strumienia głównego oraz wpływu strumieni syntetyzowanych na strumień główny.

5.1 Strumień główny

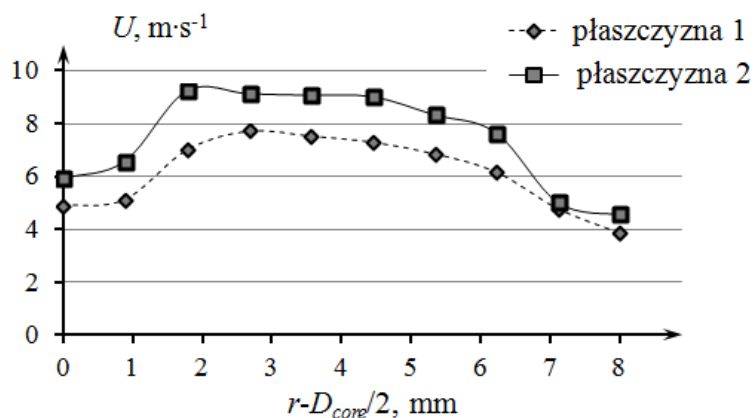
Strumień główny wypływający z dyszy nazywany był do tej pory pierścieniowym (z uwagi na kształt przypominający pierścień) oraz osiowosymetrycznym. W celu sprawdzenia osiowosymetryczności dyszy postanowiono zmierzyć profil prędkości w szczelinie pomiędzy dyszą a rdzeniem wewnętrznym. Pomiar odbył się w dwóch płaszczyznach zaznaczonych na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Budowa dyszy osiowosymetrycznej (a), płaszczyzny pomiaru profilu prędkości w szczelinie pierścieniowej (b)

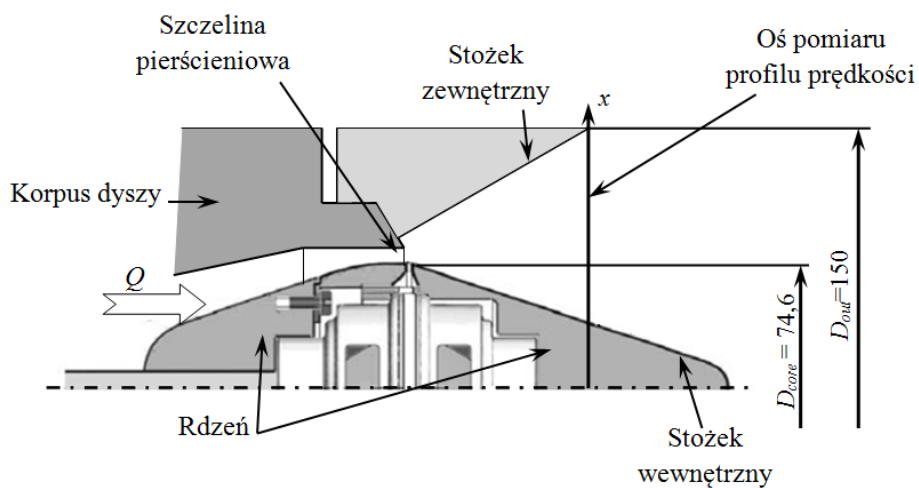
Na rys. 5.2 przedstawiono profile prędkości w płaszczyźnie 1 oraz w płaszczyźnie 2. Jak widać na wykresie, otrzymane profile prędkości znacząco różnią się od siebie. Maksymalna wartość prędkości dla płaszczyzny 1 wynosi $U_{MAX, 1} = 7,71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, natomiast dla płaszczyzny 2 – $U_{MAX, 2} = 9,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dowodzi to braku symetrii strumienia głównego. Jest to spowodowane błędami wykonania dyszy osiowosymetrycznej oraz złym pozycjonowaniem rdzenia wewnętrznego, co jest skutkiem sposobu jego zaprojektowania.

Pomimo to w trakcie pomiarów przyjęto, że strumień główny jest strumieniem osiowosymetrycznym. Pozwala to na przyjęcie uproszczenia, że pomiar profilu prędkości w osi x (rys. 2.7, rys. 5.3) dostarcza informacji o rozkładzie prędkości w całej płaszczyźnie. W dalszych analizach pominięto problem asymetrii strumienia głównego.



Rys. 5.2. Profile prędkości w szczelinie pierścieniowej dyszy osiowoosymetrycznej w dwóch płaszczyznach

Należy zauważyć, że według rys. 5.2 badana szczelina pierścieniowa miała szerokość 8 mm (oś odciętych rys. 5.2), natomiast według rys. 2.7 szczelina pierścieniowa powinna mieć szerokość ok. 5mm. W związku z czułością sondy oraz rozmiarem jej mocowania – w celu zmniejszenia możliwości uszkodzenia sondy – postanowiono zwiększyć rozmiar szczeliny pierścieniowej poprzez cofnięcie rdzenia dyszy o 6 mm. Zabieg ten nie ma wpływu na uzyskane wyniki i ich interpretację.



Rys. 5.3. Rysunek poglądowy badanej dyszy z zaznaczoną osią x pomiaru profilu prędkości strumienia głównego

5.2 Sterowanie strumieniem głównym

Zaprezentowane dotychczas rozważania przedstawiono w celu poszerzenia wiedzy z zakresu dwuelementowych, akustycznych siłowników syntetyzowanych. Siłownik tego typu, opisany szerzej w rozdziale 4, wykorzystywany jest w procesie sterowania strumieniem głównym w dyszy osiowoosymetrycznej, przedstawionej na rys. 2.7, na rys. 5.3 oraz w załączniku 1.

Głównym celem badań jest wykazanie, że istnieje możliwość przesterowania strumienia głównego w dyszy osiowoosymetrycznej za pomocą strumienia sterującego, dlatego w tej części pracy analizie poddano wpływ strumieni syntetyzowanych na strumień główny.

Na podstawie wcześniejszych badań przedstawionych w [45] 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.

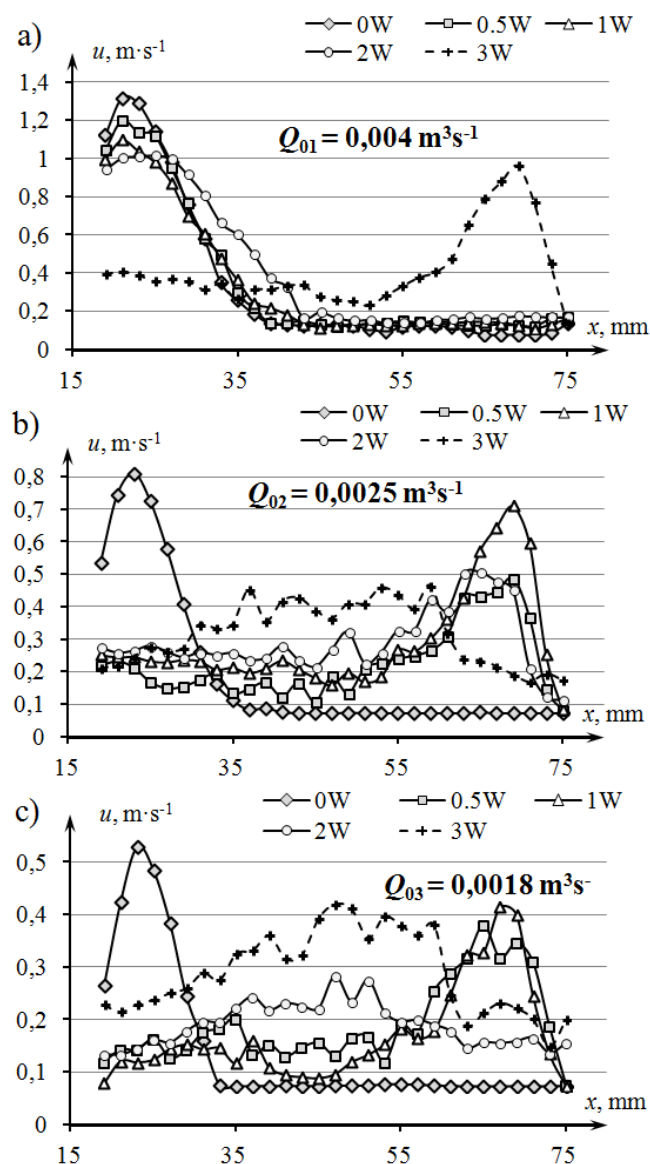
Pomiary profilu prędkości strumienia głównego odbywały się wzdłuż osi x (rys. 5.3) co 2 mm. Jest to minimalny krok przesuwu dla dostępnego układu trawersującego, który można sprząść z programem obsługującym sondę HWA.

Pomiar natężenia przepływu w dyszy odbywał się na wlocie z wykorzystaniem rotametrów opisanych w podrozdziale 3.2. Siłownik strumieni syntetyzowanych zasilany był prądem o częstotliwości f równej co do wartości częstotliwości naturalnej $f_n = 147 \text{ Hz}$ siłownika (rozdział 4, rys. 4.3).

5.2.1 Wyniki eksperymentu

Na rys. 5.4 przedstawiono wykresy profili prędkości strumienia głównego dla różnych wartości mocy czynnych P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych oraz wartości objętościowego natężenia przepływu Q strumienia głównego. Na rys. 5.4a zaprezentowano profile prędkości strumienia głównego dla wartości objętościowego natężenia przepływu $Q_{01} = 0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Strumień główny został „odepchnięty” od stożka wewnętrznego jedynie dla mocy czynnej siłownika $P_5 = 3 \text{ W}$. W

pozostałych przypadkach załączenie strumienia sterującego nie miało znacznego wpływu na strumień główny – profile prędkości strumienia głównego są do siebie bardzo podobne.



Rys. 5.4. Profile prędkości strumienia głównego dla różnych wartości mocy czynnych P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych oraz wartości objętościowego natężenia przepływu: (a) $Q_{01} = 0,004 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, (b) $Q_{02} = 0,00025 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (c) $Q_{03} = 0,00018 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

W przypadku wartości objętościowego natężenia przepływu $Q_{02} = 0,0025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ strumienia głównego załączenie strumienia sterującego miało wpływ na strumień główny w każdym przypadku (rys. 5.4b). Najwyższą wartość prędkości przy ścianie stożka zewnętrznego uzyskano dla $P_2 = 1 \text{ W}$. Profil prędkości dla $P_1 = 0,5 \text{ W}$ oraz $P_3 = 2 \text{ W}$ (rys. 5.4b) ma podobny kształt, a przepływ skupiony jest blisko ścian stożka zewnętrznego. W przypadku wartości mocy czynnej $P_4 = 3 \text{ W}$ zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych profil prędkości strumienia jest niejednoznaczny, a jego kształt może wskazywać na duże turbulencje przepływu. To może znaczyć, że wartość prędkości strumienia sterującego jest zbyt wysoka w stosunku do strumienia głównego.

Strumienie sterujące miały największy wpływ na kształt profilu prędkości strumienia o wartości objętościowego natężenia przepływu $Q_{03} = 0,0018 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 5.4c). Zarówno dla $P_3 = 2 \text{ W}$ oraz $P_4 = 3 \text{ W}$ maksymalna wartość prędkości strumienia nie jest usytuowana blisko żadnego ze stożków. W tych przypadkach należy założyć, że strumień sterujący miał zbyt wysoką wartość prędkości w stosunku do strumienia głównego.

5.2.2 Analiza badań

W podrozdziale 3.3 zdefiniowano, że strumienie syntetyzowane mogą być wykorzystane do sterowania przepływem w dyszy osiowoosymetrycznej 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. 3.1).

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

$$\frac{Q_1}{Q_2} \leq \frac{0,25}{0,75} = \frac{1}{3} \quad (5.1)$$

gdzie:

$$Q_1 = \int_{18}^{35,5} 2\pi x \cdot u \, dx \quad (5.2)$$

$$Q_2 = \int_{35,5}^{75} 2\pi x \cdot u \, dx \quad (5.3)$$

Na tej podstawie wyznaczono stosunki objętościowych natężeń przepływu Q_1/Q_2 przedstawione w tabeli 5.1. Ponadto w załączniku 4 przedstawiono wartości objętościowego natężenia przepływu Q_1 , Q_2 oraz sumaryczne natężenie przepływu Q_1+Q_2 dla poszczególnych wartości objętościowego natężenia przepływu Q strumienia głównego oraz mocy

czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych. 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 [87, 88], co pozwoliło by pozwoliło 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 5.1. Stosunek objętościowych natężeń przepływu Q_1/Q_2 dla

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 $u = 0,07 \div 1,32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla Q_{01} , $u = 0,07 \div 0,81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla Q_{02} oraz $u = 0,07 \div 0,53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla Q_{03} . Są to wartości bardzo małe, dla których błąd pomiaru za pomocą anemometru HWA jest wysoki (Załącznik 2). W związku z tym należy założyć, że zarówno profile prędkości, jak i obliczone wartości Q_1 oraz Q_2 odwzorowują jedynie pewne „trendy” zachowania się strumienia, a nie dokładne dane liczbowe.

Jednakże, mimo to analiza rys. 5.4 oraz tabela 5.1 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 $P_1 = 0,5$ W oraz $Q_1/Q_2 = 0,1509$ dla $P_2 = 1$ W. W związku z tym jako najbardziej korzystne w tym przypadku rozwiązanie przyjęto moc czynną zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych $P_1 = 0,5$ W.

Tabela 5.2. Najbardziej korzystne z badanych ustawień siłownika strumieni syntetyzowanych oraz stosunek prędkości strumieni syntetyzowanych oraz strumienia głównego

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, $c_U = U_0 \cdot \bar{U}^{-1}$
0,004	3,42	3	3,12	0,91
0,0025	2,14	0,5	1,43	0,67
0,0018	1,54	1	1,43/2,00	1,30

Tabela 5.3 Ustawienia siłownika strumieni syntetyzowanych oraz stosunek prędkości strumieni syntetyzowanych oraz strumienia głównego dla stosunku $Q_1/Q_2 = 0,15 \div 0,16$

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, $c_U = U_0 \cdot \bar{U}^{-1}$
0,004	3,42	3	3,12	0,91
0,0025	2,14	1	2	0,94
0,0018	1,54	0,5	1,43	0,93

W tabeli 5.2 przedstawiono najbardziej korzystne, pod względem stosunku Q_1/Q_2 , z badanych ustawień siłownika strumieni syntetyzowanych (moc czynną P_{RMS} zasilania siłownika oraz prędkość strumieni syntetyzowanych U_0 generowanych przy tej mocy), prędkość średnią \bar{U} strumienia głównego w szczelinie pierścieniowej dyszy (w regionie interakcji) oraz stosunek prędkości c_U . Należy zauważyć, że wartości stosunku prędkości c_U wahają się w granicach od 0,67 do 1,30. Jest to bardzo niekorzystne, gdyż stosunek prędkości c_U powinien przyjmować stałą wartość dla konkretnego urządzenia. Zależy on bowiem od wymiarów geometrycznych urządzenia i wykorzystywanych strumieni (strumienie ciągłe, syntetyzowane itp.), a nie od prędkości strumienia sterowanego. Dla przedstawionych w tabeli 5.2 wartości, stosunek Q_1/Q_2 zmienia się w zakresie od 0,1416 do 0,1614 (przy zaokrągleniu do czwartego miejsca po przecinku). W związku z tym w tabeli 5.3, zaproponowano inne ustawienia, dla których stosunek Q_1/Q_2 zmienia się w

zakresie od 0,1510 do 0,1614, co powinno spowodować mniejszy rozrzut otrzymanych wyników.

Dla zaproponowanych w tabeli 5.3 ustawień wartości stosunku prędkości c_U są zbliżone i mieszczą się w zakresie $c_U = 0,91 \div 0,94$. Oznacza, to że mimo przyjętych uproszczeń oraz błędów pomiaru spowodowanych wykorzystaną metodą (anemometr termiczny) wyznaczona wartość wskaźnika sterowania jest stała, a dla przypadku gdy $Q_1/Q_2 = 0,15 \div 0,16$ wynosi $c_U \approx 0,9$. Ustawienia takie można uznać za wystarczające do udowodnienia hipotezy pracy i określenia minimalnej wartości wskaźnika przesterowania c_U .

Autor nie dotarł do innych badań z zakresu sterowania strumieniem głównym za pomocą strumieni syntetyzowanych (adekwatnych do prezentowanych w pracy). Sprawilo to, że nie miał możliwości porównania otrzymanego stosunku prędkości c_U z innymi rodzajami zaworów. Należy jednak podkreślić, że wskaźnik ten jest stosunkowo wysoki i należałoby przeprowadzić badania mające na celu zmniejszenie go poprzez np. zmianę kąta stożka zewnętrznego lub wewnętrznego, zmianę chropowatości/faktury powierzchni opływanych przez strumień, zmianę kąta wypływu strumieni syntetyzowanych w stosunku do strumienia głównego (zmiana kąta szczeliny siłownika strumieni syntetyzowanych).

5.2.3 Podsumowanie

W tej części pracy omówiono wpływ strumienia sterującego generowanego przez siłownik strumieni syntetyzowanych na strumień główny w dyszy osiowosymetrycznej. Rozpatrzono trzy wartości natężenia przepływu Q strumienia głównego ($Q_{01} = 0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q_{02} = 0,0025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q_{03} = 0,0018 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) oraz pięć wartości mocy czynnej zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych ($P_0 = 0 \text{ W}$, $P_1 = 0,5 \text{ W}$, $P_2 = 1 \text{ W}$, $P_3 = 2 \text{ W}$, $P_4 = 3 \text{ W}$). Celem badań było wykazanie, że istnieje możliwość sterowania strumieniem głównym za pomocą strumieni syntetyzowanych. Definicję tego, co rozumie się jako pojęcie sterowania, omówiono szerzej w podrozdziale 3.3.

Badania potwierdziły hipotezę pracy, a najbardziej korzystne warunki przesterowania strumienia głównego uzyskano w przypadkach:

- $P_4 = 3 \text{ W}$ dla $Q_{01} = 0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $Q_1/Q_2 = 0,16$, $c_U = 0,91$;
- $P_1 = 0,5 \text{ W}$ dla $Q_{02} = 0,0025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $Q_1/Q_2 = 0,15$, $c_U = 0,67$;
- $P_2 = 1 \text{ W}$ dla $Q_{03} = 0,0018 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $Q_1/Q_2 = 0,14$, $c_U = 1,30$.

Dodatkowo w celu dokładniejszego obliczenia współczynnika przesterowania określono warunki, dla których uzyskane wartości stosunku Q_1/Q_2 są do siebie najbardziej zbliżone:

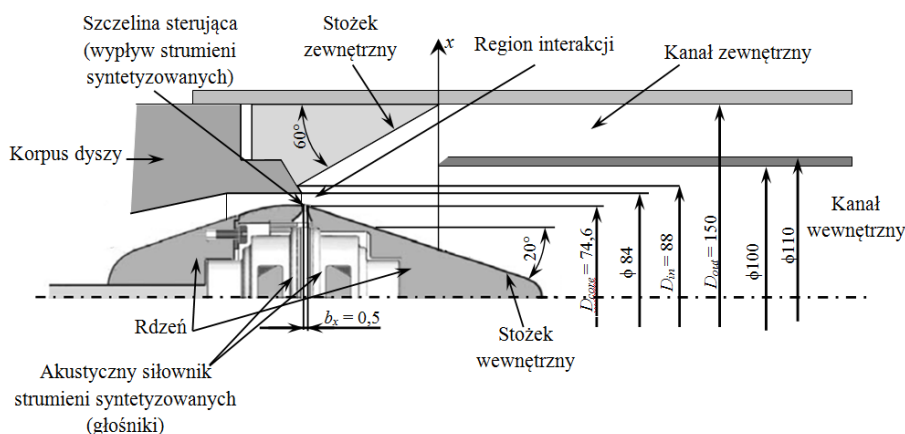
- $P_4 = 3 \text{ W}$ dla $Q_{01} = 0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $Q_1/Q_2 = 0,16$, $c_U = 0,91$;
- $P_2 = 1 \text{ W}$ dla $Q_{02} = 0,0025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $Q_1/Q_2 = 0,15$, $c_U = 0,94$;
- $P_1 = 0,5 \text{ W}$ dla $Q_{03} = 0,0018 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $Q_1/Q_2 = 0,15$, $c_U = 0,93$.

Powyższe ustawienia nie są optymalne ani najlepsze, jakie udało się uzyskać jednakże są wystarczające, aby wykazać słuszność postawionej w pracy hipotezy oraz do wyznaczyć minimalny stosunek prędkości $c_{U, min} = 0,9$.

5.3 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. 5.5):

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



Rys. 5.5. Rysunek zaworu osiowosymetrycznego wykorzystujący badaną dyszę osiowosymetryczną

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).

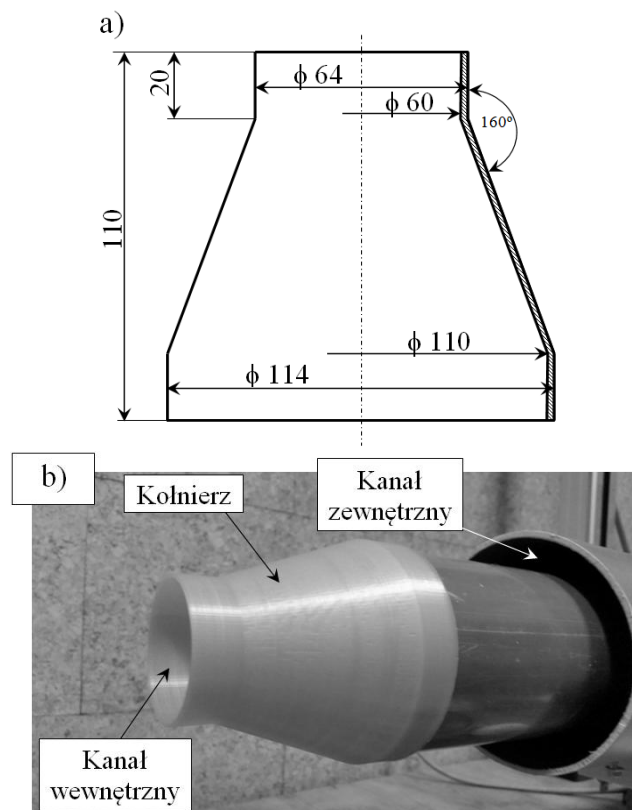
Należy zauważyć, że wymiary kanałów zewnętrznego i wewnętrznego różnią się od założeń przyjętych w pracy. Jednakże na podstawie przeprowadzonych badań, opisanych w podrozdziale 5.2, przyjęto że taki wymiar kanałów będzie wystarczający do przeprowadzenia badania funkcjonowania zaworu osiowosymetrycznego.

Przesterowanie strumienia głównego uznaje się za wystarczającej w przypadku, gdy po załączeniu strumienia sterującego co najmniej 75% objętości strumienia przepłynie 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 ciepłodrutowego HWA generowałby 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. 5.6. Pomiar prędkości średniej odbywał się na wylocie przedstawionego kołnierza.

Pomiary przeprowadzono dla trzech wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania silownika strumieni syntetyzowanych $P_0 = 0$ W, $P_3 = 2$ W, $P_4 = 3$ W (oznaczenia tożsame z oznaczeniami wykorzystanymi w podrozdziale 5.2).



Rys. 5.6. Rysunek kołnierza pomiarowego (a), zdjęcie zamontowanego na kanale wewnętrznym kołnierza (b)

5.3.1 Wyniki eksperymentu

W tabelach 5.4 oraz 5.5 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} . Pomiar przeprowadzono dla wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych $P_0 = 0$ W oraz $P_3 = 2$ W (tabela 5.4) i $P_4 = 3$ W (tabela 5.5).

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 5.4. 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 , $m^3 \cdot s^{-1}$	$P_0 = 0$ W			$P_3 = 2$ W		
	\bar{u}_{in} , $m \cdot s^{-1}$	Q_{in} , $m^3 \cdot s^{-1}$	Q_{out} , $m^3 \cdot s^{-1}$	\bar{u}_{in} , $m \cdot s^{-1}$	Q_{in} , $m^3 \cdot s^{-1}$	Q_{out} , $m^3 \cdot s^{-1}$
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 5.5. 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 , $m^3 \cdot s^{-1}$	$P_0=0W$			$P_4=3W$		
	\bar{u}_{in} , $m \cdot s^{-1}$	Q_{in} , $m^3 \cdot s^{-1}$	Q_{out} , $m^3 \cdot s^{-1}$	\bar{u}_{in} , $m \cdot s^{-1}$	Q_{in} , $m^3 \cdot s^{-1}$	Q_{out} , $m^3 \cdot s^{-1}$
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

5.3.2 Analiza badań

W tabela 5.6 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 $Q = 0,0040$ $m^3 \cdot s^{-1}$ 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 [85, 91, 92], 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 $P_3 = 2 \text{ W}$. 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 5.6. 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	-

W Błąd! Nieprawidłowy odsyłacz do zakładki: wskazuje na nią samą. przedstawiono parametry strumienia głównego oraz siłownika strumieni syntetyzowanych, dla których przesterowanie strumienia głównego było wystarczające, aby spełnić założone kryterium, oraz uzyskane w tych przypadkach współczynniki prędkości c_U .

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

$P_2 = 3\text{ W}$. Należy zauważyć, że rozkład strumienia na kanał zewnętrzny i wewnętrzny jest podobny do przypadków przedstawionych w tabeli 5.2 ($Q_{in}/Q_{out} = 0,19$), a uzyskany współczynnik c_U przyjmuje niewiele większą wartość.

Tabela 5.7. 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

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

5.3.3 Podsumowanie

W podrozdziale przedstawiono badania zaworu osiowosymetrycznego opartego na badanej wcześniej dyszy. Dla sześciu różnych wartości objętościowego natężenia przepływu Q strumienia głównego i trzech różnych wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych zmierzono objętościowe natężenia 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. Ponadto przedstawiono warunki pracy zaworu, dla których co najmniej 75% objętości strumienia głównego przepływa przez kanał zewnętrzny po załączeniu siłownika strumieni syntetyzowanych, i wyznaczono w tych przypadkach stosunki prędkości c_U :

- $P_4 = 3 \text{ W}$ dla $Q = 0,0034 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $c_U = 1,07$;
- $P_3 = 2 \text{ W}$ dla $Q = 0,0028 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $c_U = 1,20$;
- $P_3 = 2 \text{ W}$ dla $Q = 0,0023 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ – $c_U = 1,46$.

Uzyskane współczynniki c_U zgadzają się co do wartości z współczynnikami uzyskanymi dla dyszy osiowosymetrycznej.

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

5.4 Wnioski dotyczące rozdziału

W powyższym rozdziale przedstawiono badania zaworu osiowosymetrycznego. W podrozdziale 5.1 zaprezentowano badania

strumienia głównego przy wyłączonym siłowniku strumieni syntetyzowanych. W szczególności skupiono się na wykazaniu braku osiowosymetryczności strumienia powietrza przepływającego przez dysze. Pomimo to przyjęto, że strumień należy traktować jako osiowosymetryczny w czasie dalszych badań.

W następnym podrozdziale wyznaczono profile prędkości strumienia głównego dla trzech wartości natężenia przepływu Q strumienia głównego oraz pięciu wartości mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika strumieni syntetyzowanych. Na podstawie otrzymanych profili prędkości wyznaczono wartości natężenia przepływu strumieni przepływających przez wyznaczone w podrozdziale 3.3 pola pomiarowe S_1 i S_2 . Ostatecznie wykazano najbardziej korzystne oraz najbardziej podobne, wśród badanych, parametry funkcjonowania dyszy pod względem spełniania założonych warunków. Dla tych parametrów obliczono współczynnik przesterowania c_U , którego wartość przyjęto za poprawną.

W podrozdziale 5.3 przedstawiono zawór osiowosymetryczny wykorzystujący badaną dyszę osiowosymetryczną. Na tym etapie badano procentowy rozkład objętościowych natężeń przepływu na kanał wewnętrzny i kanał zewnętrzny przy różnych wartościach objętościowego natężenia przepływu Q oraz mocy czynnej P_{RMS} zasilania siłownika. Dla ustawień zaworu, w których co najmniej 75% objętości powietrza przepływało przez kanał zewnętrzny obliczono współczynnik przesterowania c_U .

W powyższym rozdziale potwierdzono hipotezę, że istnieje możliwość sterowania strumieniem głównym w dyszy osiowosymetrycznej za pomocą strumieni syntetyzowanych.

6. PODSUMOWANIE PRACY

6.1 Podsumowanie głównej części rozprawy

Przedstawiona praca została podzielona na dwie zasadnicze części. Pierwszą – teoretyczną – poświęcono analizie literatury, zagadnieniom z zakresu realizowanych badań oraz z zakresu metodyki badań (rozdz. 1 – 3). W tej części pracy na szczególną uwagę zasługuje podrozdział 3.3, w którym zdefiniowano strumień przesterowany, a w szczególności – parametry jakie musi wykazać strumień, aby jednoznacznie (zdaniem autora) potwierdzić hipotezę pracy.

Drugą część rozprawy poświęcono natomiast badaniom własnym, a w szczególności badaniom dwuelementowych siłowników strumieni syntetyzowanych (rozdz. 4) oraz badaniu możliwości wykorzystania strumieni syntetyzowanych w sterowaniu strumieniem głównym w dyszy, a następnie w zaworze osiowosymetrycznym (rozdz. 5).

Wśród badań siłowników strumieni syntetyzowanych należy wyróżnić:

- analizę teoretyczną i badania wpływu zamkniętej komory powietrza, znajdującej się za membraną głośnika, na generowane przez siłownik strumieni syntetyzowanych strumienie – porównanie prędkości – i innych parametrów – siłownika strumieni syntetyzowanych z membraną bez komory oraz z zamkniętą komorą za membraną (cel b; podrozdz. 4.1);
- porównanie strumieni generowanych przez siłownik z dwoma oraz jednym elementem wykonawczym, głównie ze względu na prędkość generowanych strumieni oraz sprawność siłownika strumieni syntetyzowanych (cel a; podrozdz. 4.1);
- badanie możliwości sterowania prędkością strumieni generowanych przez dwuelementowy, akustyczny siłownik poprzez zmianę przesunięcia fazowego pomiędzy prądem zasilającym poszczególne elementy wykonawcze/głośniki (cel c; podrozdz. 4.2);
- badania wpływu odległości między elementami wykonawczymi oraz średnicy dyszy siłownika na parametry strumieni syntetyzowanych, generowanych przez dwuelementowy, akustyczny siłownik (podrozdz. 4.3);
- wykazanie możliwości stosowania współczynnika CR przy projektowaniu dwuelementowych, akustycznych siłowników strumieni syntetyzowanych (wzór obliczono dla jednoelementowych siłowników piezoelektrycznych; podrozdz. 4.3);

- wykazanie braku możliwości stosowania wzorów na częstotliwość naturalną siłownika (znalezionych w literaturze) przy projektowaniu dwuelementowych, akustycznych siłowników strumieni syntetyzowanych (podrozdz. 4.3).

Wśród badań poświęconych osiowosymetrycznym: dyszy i zaworowi należy wyróżnić:

- badanie osiowosymetryczności strumienia głównego w stanie ustalonym (podrozdz. 5.1);
- badania rozkładu profilu prędkości strumienia głównego w przypadku wyłączanego siłownika strumieni osiowosymetrycznych oraz dla siłownika zasilanego prądem o różnej wartości mocy czynnej; w tej części rozprawy potwierdzono hipotezę pracy (cel główny/hipoteza; podrozdz. 5.2);
- wyznaczenie parametrów sterowania – stosunku prędkości dla parametrów pracy dyszy osiowosymetrycznej, przy której następuje przesterowanie strumienia głównego (cel d, podrozdz. 5.2);
- skonstruowanie – na podstawie wcześniejszych badań, z wykorzystaniem dyszy osiowosymetrycznej – zaworu oraz przebadanie go ze względu na jakość funkcjonowania; wykazano, że wybrana budowa zaworu jest wystarczająca i spełnia postawione wymagania (cel e, rozdział 5.3).

6.2 Ograniczenia i krytyczna refleksja

W przeprowadzonych badaniach dokonano licznych uproszczeń, a wielu aspektów badanych zjawisk nie uwzględniono w czasie analizy (najczęściej nie były one celem badań). Ponadto wiele wyników może wydawać się niezadowolających. W związku z tym poniżej przedstawiono wykaz zagadnień, które zdaniem autora wymagają komentarza lub powinny być przedmiotem dodatkowych badań w przyszłości:

- analiza teoretyczna oraz danych eksperymentu prędkości w strumieniach syntetyzowanych generowanych przy przesunięciu fazowym prądów zasilających poszczególne głośniki wykazuje znaczącą rozbieżność – zdaniem autora należałoby przeprowadzić wizualizacje generowanych w ten sposób siłowników strumieni syntetyzowanych i porównać je ze strumieniami generowanymi w klasyczny sposób;

- w analizie wpływu cech geometrycznych siłownika na generowane strumienie zabrakło analizy wpływu długości dyszy, ponadto dysza była „zaokrąglona” od strony komory siłownika, co wynikało z konstrukcji siłownika – analiza długości i kształtu dyszy została dobrze opisana w literaturze; parametry te wpływają głównie na częstotliwość Helmholtza, przez co zdaniem autora ich analiza nie wniosłaby żadnego elementu nowości w przeprowadzone badania;
- badania siłowników dwuelementowych ograniczyły się jedynie do porównania ich z siłownikami jednoelementowymi – w przyszłości siłowniki takie powinny zostać porównane również z innymi typami siłowników syntetyzowanych, między innymi z siłownikami bliźniaczymi lub hybrydowymi;
- niewielki i punktowy zakres rozpatrywanych wartości natężeń przepływu strumienia głównego (w dyszy osiowosymetrycznej) oraz mocy czynnej zasilania siłownika – badaną dyszę osiowosymetryczną zaprojektowano z wykorzystaniem badań innych autorów (o czym wspomniano w podrozdziale 2.2), a możliwość sterowania strumieniem głównym zależała przede wszystkim od geometrii dyszy oraz prędkości generowanych strumieni; zmiana geometrii dyszy lub optymalizacja parametrów jej funkcjonowania nie były przedmiotem pracy;
- w pracy nie podjęto tematyki wpływu kąta stożka wewnętrznego i zewnętrznego na możliwość sterowania strumieniem głównym, podczas gdy są to podstawowe parametry dyszy wpływające na jej funkcjonowanie – temat należałoby podjąć w przyszłych badaniach;
- w pracy nie podjęto tematyki powrotu strumienia głównego do pozycji ustalonej po wyłączeniu siłownika strumieni syntetyzowanych, co jest w szczególności problematyczne przy niewielkich natężeniach przepływu strumienia głównego – problem ten można stosunkowo prosto usunąć, jak choćby przez wprowadzenie spoilera na stożku zewnętrznym lub utworzenie szczeliny między korpusem dyszy a stożkiem zewnętrznym; rozpatrzenie tego problemu nie było jednak konieczne do potwierdzenia hipotezy pracy.

6.3 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 ciągłe 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.

6.4 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.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Luo, X., Sun, B., Wang, X., 2017, Experimental investigation on a cavity-step-actuated supersonic oscillating jet, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, no. 1, pp. 274–281.
- [2] Sun, B., Feng, F., Wu, X., Luo, X., 2015, Experimental investigations of cavity-actuated supersonic oscillating jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 68, pp. 155–162.
- [3] Zhang, P., Wang, J., Feng, L., 2008, Review of zero-net-mass-flux jet and its application in separation flow control, *Science in China, Series E: Technological Sciences*, vol. 51, no. 9, pp. 1315–1344.
- [4] Trávníček, Z., Tesař, V., 2003, Annular synthetic jet used for impinging flow mass-transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 3291–3297.
- [5] Zander, V., Hecklau, M., Nitsche, W., Huppertz, A., Swoboda, M., 2011, Active flow control by means of synthetic jets on a highly loaded compressor cascade, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 225, no. 7, pp. 897–908.
- [6] Tamburello, D. A., Amitay, M., 2008, Active control of a free jet using a synthetic jet, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 29, no. 4, pp. 967–984.
- [7] Tesař, V., Smyk, E., 2015, Fluidic low-frequency oscillator with vortex spin-up time delay, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 90, pp. 6–15.
- [8] Amitay, M., Honohan, A., Trautman, M., Glezer, A., Amitay, M., Honohan, A., Trautman, M., Glezer, A., 1997, Modification of the aerodynamic characteristics of bluff bodies using fluidic actuators, in *28th Fluid Dynamics Conference*.
- [9] Ciuryła, M., Liu, Y., Farnsworth, J., Kwan, C., Amitay, M., 2007, Flight Control Using Synthetic Jets on a Cessna 182 Model, *Journal of Aircraft*, vol. 44, no. 2, pp. 642–653.
- [10] Krieg, M., Mohseni, K., 2008, Thrust characterization of a bioinspired vortex ring thruster for locomotion of underwater robots, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 123–132.
- [11] Krieg, M., Mohseni, K., 2010, Dynamic modeling and control of biologically inspired vortex ring thrusters for underwater robot locomotion, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 3, pp. 542–554.
- [12] Krieg, M., Mohseni, K., 2013, Modelling circulation, impulse and kinetic energy of starting jets with non-zero radial velocity, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 719, pp. 488–526.
- [13] Chaudhari, M., Puranik, B., Agrawal, A., 2010, Effect of orifice

- shape in synthetic jet based impingement cooling, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, no. 2, pp. 246–256.
- [14] Schwickert, M., Noska, B., 2011, LED Cooling in Harsh Environments with Synthetic Jet Technology, *LED - professional*, no. May/June 2011, pp. 2–5.
- [15] Kloppers, J. C., Kröger, D. G., 2003, Loss coefficient correlation for wet-cooling tower fills, *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 17, pp. 2201–2211.
- [16] Jang, D., Lee, K. S., 2014, Flow characteristics of dual piezoelectric cooling jets for cooling applications in ultra-slim electronics, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 79, pp. 201–211.
- [17] Mitchell, G., Benard, S. E., Cooper, R., 2007, Interaction of synthetic jet with a thermal turbulent boundary layer, in *Diss. Queens University Belfast*.
- [18] Leschziner, M. A., Lardeau, S., 2011, 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*, vol. 369, no. 1940, pp. 1495–1512.
- [19] Feng, L.-H., Wang, J.-J., 2014, Modification of a circular cylinder wake with synthetic jet: Vortex shedding modes and mechanism, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 43, pp. 14–32.
- [20] Chandrasekhara, M. S., Tung, C., Martin, P. B., 2004, Aerodynamic Flow Control using a Variable Droop Leading Edge Airfoil, in *Proceedings of the RTO AVT Specialists Meeting on “Enhancement of NATO Military Flight Vehicle Performance by Management of Interacting Boundary Layer Transition and Separation” (MUMPITZ)*, October 2004, pp. 4–7.
- [21] De Giorgi, M. G., De Luca, C. G., Ficarella, A., Marra, F., 2015, Comparison between synthetic jets and continuous jets for active flow control: Application on a NACA 0015 and a compressor stator cascade, *Aerospace Science and Technology*, vol. 43, pp. 256–280.
- [22] Raju, R., Aram, E., Mittal, R., Cattafesta, L., 2009, Simple Models of Zero-Net Mass-Flux, *International journal of Flow Control*, vol. 1, no. 3, pp. 179–198.
- [23] Smyk, E., 2017, Strumienie syntetyzowane - wybrane zastosowania, in *Nauka nie jedno ma imię... TOM IV*, Bydgoszcz: Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, pp. 115–126.
- [24] Brouckova, Z., 2009, Aktivní řízení anulárního proudu radiálním syntetizovaným proudem (Active control of annular valve by radial synthetic jet, in Czech), *Doctoral Thesis*.

- [25] Broučková, Z., Kordík, J., Travnicek, Z., Tesař, V., 2010, Aktivní řízení anulárního proudu radiálním syntetizovaným proudem (Active control of annular valve by radial synthetic jet, in Czech), in *Topical problems of fluid mechanics*.
- [26] Gil, P., Strzelczyk, P., 2014, Kryterium powstawania strugi syntetycznej, *Mechanika*, vol. 86, no. 17, pp. 517–525.
- [27] Gil, P., Strzelczyk, P., 2015, Porównanie właściwości chłodzących strugi syntetycznej i strugi swobodnej, *Mechanika*, vol. 87, no. 17, pp. 105–117.
- [28] Gil, P., 2016, Przejście strugi syntetycznej w strugę turbulentną, *Mechanika*, vol. 88, no. 16, pp. 37–46.
- [29] Peszyński, K., Wawrzyniak, S., 2005, Badanie strumienia syntetycznego generowanego w szczelinie promieniowej, *Pneumatyka*, vol. 5, no. 51, pp. 56–59.
- [30] Smyk, E., 2016, Metoda porównania wpływu parametrów zaworu osiowosymetrycznego na jego działania, *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, vol. 7, no. 4, pp. 47–56.
- [31] Mohseni, K., Mittal, R., Editors, 2014, *Synthetic Jets: Fundamentals and Applications*, CRC Press.
- [32] Greco, C. S., Paolillo, G., Ianaro, A., Cardone, G., de Luca, L., 2018, Effects of the stroke length and nozzle-to-plate distance on synthetic jet impingement heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 117, pp. 1019–1031.
- [33] Khaleghinia, J., Kowsary, F., Aghanajafi, C., 2017, Effects of arrangement and phase difference of oscillation of synthetic jets on heat transfer in micro-channels, *Mechanika*, vol. 23, no. 1, pp. 78–83.
- [34] Girfoglio, M., Greco, C. S., Chiatto, M., de Luca, L., 2015, Modelling of efficiency of synthetic jet actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 233, pp. 512–521.
- [35] Chiatto, M., Capuano, F., Coppola, G., De Luca, L., 2017, LEM characterization of synthetic jet actuators driven by piezoelectric element: A review, *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 6.
- [36] Jabbal, M., Jeyalingam, J., 2017, Towards the noise reduction of piezoelectrical-driven synthetic jet actuators, *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 266, pp. 273–284.
- [37] Mane, P., Mossi, K., Bryant, R., 2005, Synthetic jets with piezoelectric diaphragm, vol. 5761, pp. 233–243.
- [38] Kordík, J., Trávníček, Z., Timchenko, V., Ismail, N. A., 2017, The predominant effect of stroke length on velocity profiles at the exit of axisymmetric synthetic jet actuators, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 66, pp. 197–208.
- [39] Kordík, J., Trávníček, Z., 2017, Comparison of synthetic jet actuators based on sharp-edged and round-edged nozzles, *EJP Web*

- of Conferences, vol. 143, no. 2053.
- [40] Tesař, V., Trávníček, Z., Kordík, J., Broučková, Z., 2009, Fluidic circuit theory applied to problem of resonant frequency of synthetic-jet actuators, *International Conference on Developments in Machinery Design and Control 2009*, no. December 2009, pp. 97–98.
 - [41] Bhapkar, U. S., Srivastava, A., Agrawal, A., 2013, Acoustic and heat transfer aspects of an inclined impinging synthetic jet, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 74, no. C, pp. 145–155.
 - [42] Xu, F., Gao, Z., Ming, X., Xia, L., Wang, Y., Sun, W., Ma, R., 2015, The optimization for the backward-facing step flow control with synthetic jet based on experiment, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 64, pp. 94–107.
 - [43] Tesař, V., Broučková, Z., Kordík, J., Trávníček, Z., Peszynski, K., 2012, Valves with flow control by synthetic jets, *EPJ Web of Conferences*, vol. 25, p. 1092.
 - [44] Trávníček, Z., Tesař, V., Broučková, Z., Peszynski, K., 2014, Annular impinging jet controlled by radial synthetic jet, *Heat Transfer Engineering*, vol. 35, no. 16, pp. 1–12.
 - [45] Tesař, V., Pavelka, M., Smyk, E., Peszynski, K., 2014, Control of flow separation by vestigial “Synthetic Jet”, in *Fluidic Dynamics*.
 - [46] Tesař, V., Smyk, E., Peszynski, K., 2014, Fluidic oscillator with bistable turn-down amplifier, in *Fluidic Dynamics*.
 - [47] Wawrzyniak, S., 2008, Wpływ oscylacji przepływu powietrza na proces przenoszenia ciepła, *Pneumatyka*, vol. 2, no. 67, pp. 23–26.
 - [48] Tesař, V., Trávníček, Z., Způsob dvouřezimového řízení průtoku tekutiny a zařízení k provádění tohoto způsobu (Ways and means for two-regime control of fluid flow; in Czech), *Czech Republic Patent Document Nr. 303280*, DOI: 10.13140/2.1.4160.8963 filed 30th Jul 2010.
 - [49] Tang H., Zhong S., 2006, Incompressible flow model of synthetic jet actuators, *AIAA Journal*, vol. 44, pp. 908.
 - [50] Smith, B. L., Glezer, A., 1998, The formation and evolution of synthetic jets, *Physics of Fluids*, vol. 10, no. 9, pp. 2281–2297.
 - [51] Mohseni, K., 2006, Pulsatile vortex generators for low-speed maneuvering of small underwater vehicles, *Ocean Engineering*, vol. 33, no. 16, pp. 2209–2223.
 - [52] Krishnan, G., Mohseni, K., 2009, Axisymmetric Synthetic Jets: An Experimental and Theoretical Examination, *AIAA Journal*, vol. 47, no. 10, pp. 2273–2283.
 - [53] Mitosek, M., 2007, *Mechanika plynůw w inżynierii i ochronie środowiska*, Oficyna Politechniki Warszawskiej.
 - [54] Smith, B. L., Glezer, A., 2002, Jet vectoring using synthetic jets,

- Journal of Fluid Mechanics, vol. 458, pp. 1–34.
- [55] Kordík, J., Trávníček, Z., 2017, Optimal diameter of nozzles of synthetic jet actuators based on electrodynamic transducers, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 86, pp. 281–294.
- [56] Smith, B. L., Swift, G. W., 2003, A comparison between synthetic jets and continuous jets, *Experiments in Fluids*, vol. 34, no. 4, pp. 467–472.
- [57] Tanh, H., Zhong, S., 2006, Incompressible Flow Model of Synthetic Jet Actuator, *AIAA Journal*, vol. 44, no. 4, pp. 908–912.
- [58] Beranek, L. L., 1993, *Acoustics*, New York: Acoustical Society of America.
- [59] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V., 1999, *Fundamentals of acoustics*, New York: Wiley.
- [60] Kordík, J., 2011, Theoretical and experimental analysis of synthetic and hybrid synthetic jet actuators, *Doctoral Thesis*.
- [61] de Luca, L., Girfoglio, M., Coppola, G., 2014, Modeling and Experimental Validation of the Frequency Response of Synthetic Jet Actuators, *AIAA Journal*, vol. 52, no. 8, pp. 1733–1748.
- [62] Maršík, F., Vít, T., Boer, P. De., 2004, Synthetic jet actuation at the resonance frequency, in *21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM)*, p. 113.
- [63] Greco, C. S., Ianiro, A., Imbriale, M., Astarita, T., Cardone, G., 2012, PIV measurements in twin synthetic jets, in *15th International Symposium of Flow Visualisation*.
- [64] Greco, C. S., Ianiro, A., Astarita, T., Cardone, G., 2013, On the near field of single and twin circular synthetic air jets, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 44, pp. 41–52.
- [65] Cengel, Y. A., Cimbala, J. M., 2006, *Fluid mechanics: fundamentals and applications*, Mc Graw-Hill, Higher Education.
- [66] Holman, R., Utturkar, Y., Mittal, R., Smith, B. L., Cattafesta, L., 2005, Formation Criterion for Synthetic Jets, *AIAA Journal*, vol. 43, no. 10, pp. 2110–2116.
- [67] Trávníček, Z., Broučková, Z., Kordík, J., 2012, Formation Criterion for Axisymmetric Synthetic Jets at High Stokes Numbers, *AIAA Journal*, vol. 50, no. 9, pp. 2012–2017.
- [68] Trávníček, Z., Vít, T., Tesař, V., 2006, Hybrid synthetic jet as the non-zero-net-mass-flux jet, *AIP Physics of Fluids*, vol. 18, p. 81701.
- [69] Kordík, J., Trávníček, Z., Pavelka, M., 2015, Energetic efficiencies of synthetic and hybrid synthetic jet actuators driven by electrodynamic transducers, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 69, pp. 119–126.
- [70] Broučková, Z., Trávníček, Z., 2015, Visualization study of hybrid synthetic jets, *Journal of Visualization*, pp. 1–16.

- [71] Paolillo, G., Greco, C. S., Cardone, G., 2017, The evolution of quadruple synthetic jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 89, no. April, pp. 259–275.
- [72] Greco, C. S., Castrillo, G., Crispo, C. M., Astarita, T., Cardone, G., 2016, Investigation of impinging single and twin circular synthetic jets flow field, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 74, pp. 354–367.
- [73] Cziesla, T., Biswas, G., Chattopadhyay, H., Mitra, N. K., 2001, Large-eddy simulation of flow and heat transfer in an impinging slot jet, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 22, no. 5, pp. 500–508.
- [74] Narayanan, V., Seyed-Yagoobi, J., Page, R. H., 2004, An experimental study of fluid mechanics and heat transfer in an impinging slot jet flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 8, pp. 1827–1845.
- [75] Trávníček, Z., Tesař, V., 2008, Hysteretic behaviour of annular impinging jets, in *5th European Thermal-Sciences Conference*, The Netherlands.
- [76] Tesař, V., 2013, Hysteresis in annular impinging jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 44, pp. 565–570.
- [77] Trávníček, Z., Peszyński, K., Hošek, J., Wawrzyniak, S., 2003, Aerodynamic and mass transfer characteristics of an annular bistable impinging jet with a fluidic flip-flop control, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 7, pp. 1265–1278.
- [78] Wawrzyniak, S., 2008, Stanowisko do badania właściwości przepływowych dyszy osiowosymetrycznej, *Pneumatyka*, vol. 3, no. 68, pp. 25–28.
- [79] Tesař, V., 2004, Fluidic Valve for Reactor Regeneration Flow Switching, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 82, no. 3, pp. 398–408.
- [80] Tesař, V., 2005, Fluidic Valves for Variable-Configuration Gas Treatment, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 83, no. 9, pp. 1111–1121.
- [81] Wawrzyniak, S., 2008, Kształtowanie parametrów roboczych monostabilnego elementu strumieniowego dużej mocy w aspekcie procesu wymiany ciepła, *UTP University of Science and Technology*.
- [82] Wawrzyniak, S., Kordík, J., Trávníček, Z., Peszyński, K., 2013, Wizualizacja przepływu strumienia powietrza przez zadymianie, *Pneumatyka*, vol. 3/4, no. 88/89, pp. 42–44.
- [83] Allery, C., Guerin, S., Hamdouni, A., Sakout, A., 2004, Experimental and numerical POD study of the Coanda effect used to reduce self-sustained tones, *Mechanics Research Communications*, vol. 31, no. 1, pp. 105–120.

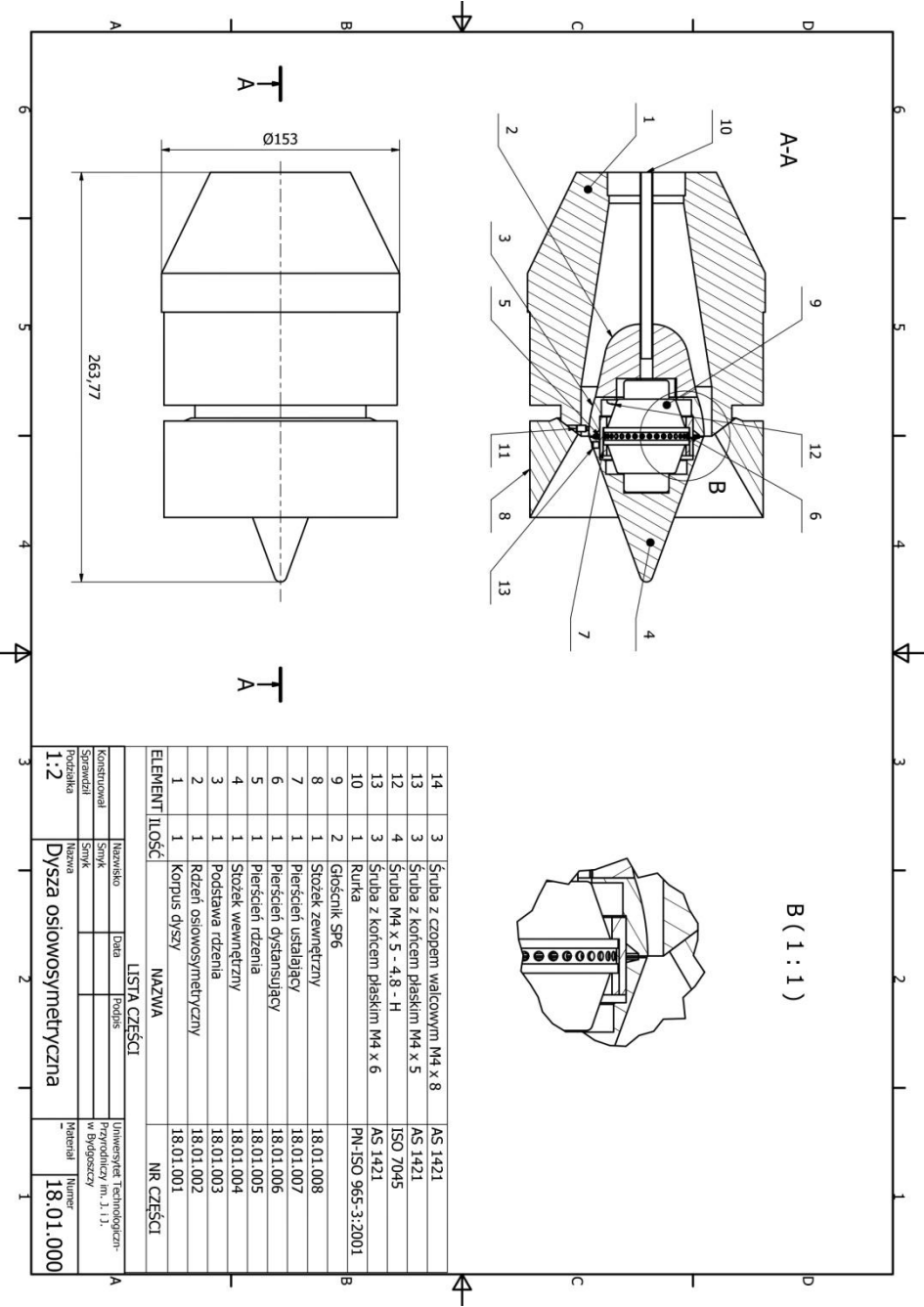
- [84] Lalli, F., Bruschi, A., Lama, R., Liberti, L., Mandrone, S., Pesarino, V. Mar., 2010, Coanda effect in coastal flows, *Coastal Engineering*, vol. 57, no. 3, pp. 278–289.
- [85] Gilchrist, A. R., Gregory-Smith, D. G. Sep., 1988, Compressible Coanda wall jet: predictions of jet structure and comparison with experiment, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 9, no. 3, pp. 286–295.
- [86] Broučková, Z., Kordik, J., 2009, Travnicek, Z., Aktivní řízení anulárního proudu radiálním syntetizovaným proudem (Active annular flow control with radial synthetic jets), research report Z-Z 1438/09, Institute of Thermomechanics of the ASCR, v. v. I.
- [87] Bruun, H. H., 1995, Hot-wire anemometry: principles and signal analysis, Oxford University Press, Oxford.
- [88] Jørgensen, F. E., 2002, How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide, Dantec Dynamics A/S, Denmark.
- [89] Gil, P., Strzelczyk, P., 2016, Performance and efficiency of loudspeaker driven synthetic jet actuator, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 76, pp. 163–174
- [90] Dumitrache, A., Frunzulica, F., Ionescu, T. C. Mathematical Modelling and Numerical Investigations on the Coanda Effect, in *Nonlinearity, Bifurcation and Chaos – Theory and Applications 2.*, P. Hagedorn and J. Awrejcewicz, Eds., 2012, pp. 101–132.
- [91] Dragan, V., 2013, A new mathematical model for high thickness Coanda effect wall jets, *Review of the Air Force Academy*, vol. 1, no. 1, pp. 23–28.

Źródła internetowe:

[92] <http://www.dictionary.com/browse/synthetic> – dostęp 26.04.2017

[93] <http://sjp.pwn.pl/slowniki/syntetyczny.html> – dostęp 26.04.2017

ZAŁĄCZNIK 1.
DYSZA OSIOWOSYMETRYCZNA

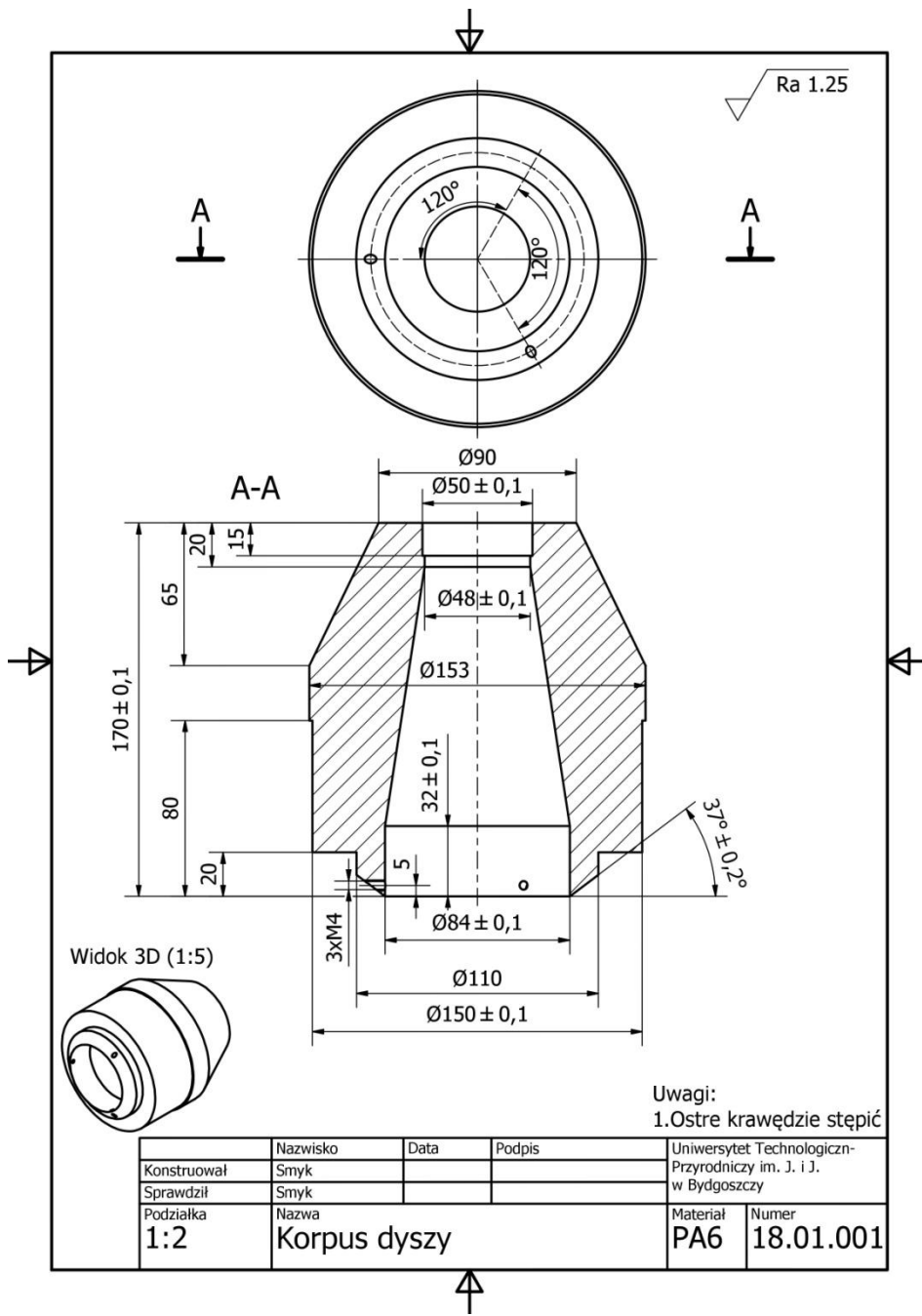


14	3	Śruba z czopem walcowym M4 x 8	AS 1421
13	3	Śruba z końcem płaskim M4 x 5	AS 1421
12	4	Śruba M4 x 5 - 4,8 - H	ISO 7045
13	3	Śruba z końcem płaskim M4 x 6	AS 1421
10	1	Kulka	PN-ISO 965-3:2001
9	2	Głościk SP6	
8	1	Stożek zewnętrzny	18.01.008
7	1	Pierścień ustalający	18.01.007
6	1	Pierścień dystansujący	18.01.006
5	1	Pierścień rdzenia	18.01.005
4	1	Stożek wewnętrzny	18.01.004
3	1	Podstawa rdzenia	18.01.003
2	1	Rdzeń osłowoosymetryczny	18.01.002
1	1	Korpus dyszy	18.01.001

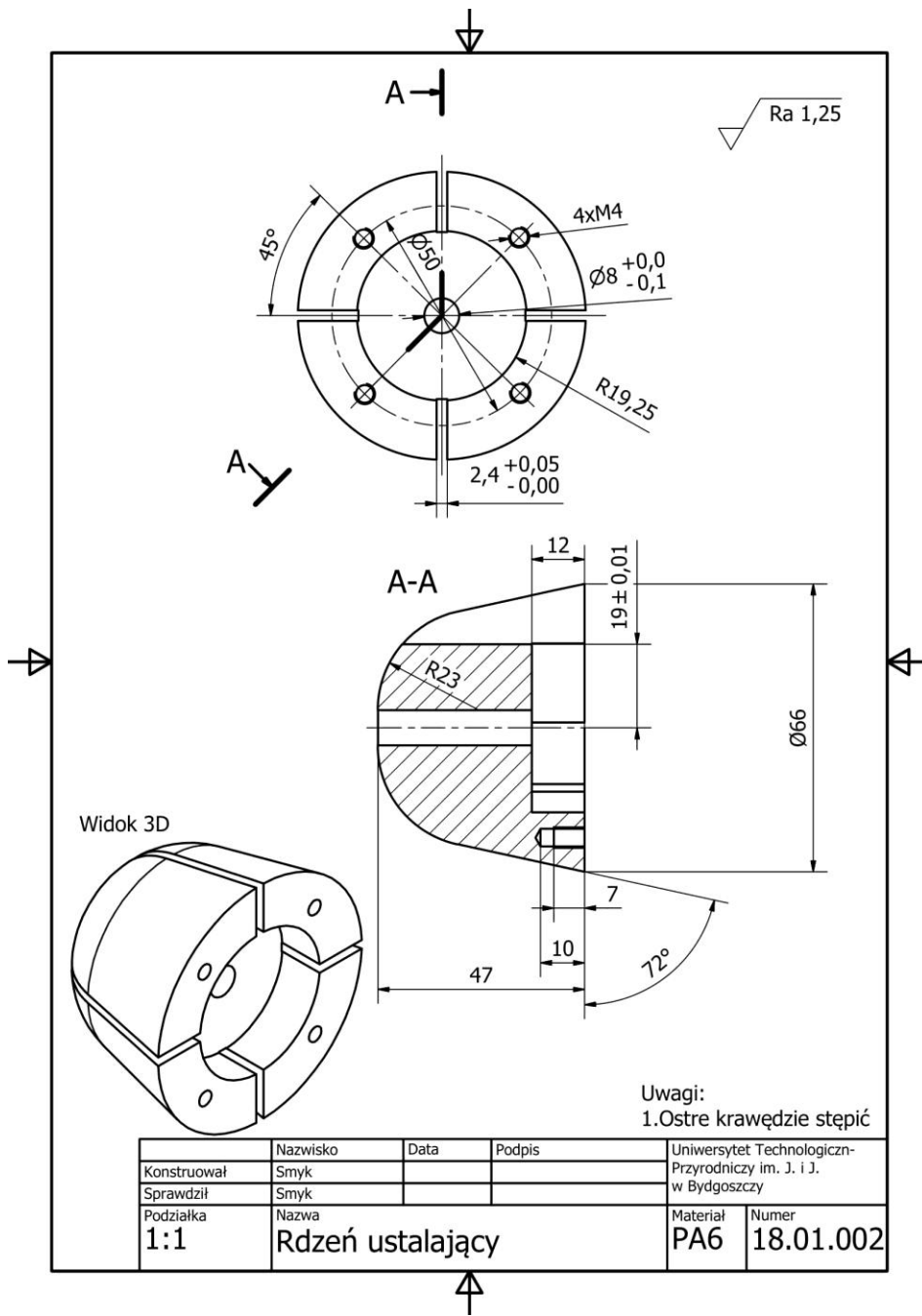
ELEMENT ILOŚĆ NAZWA NR CZĘŚCI

LISTA CZĘŚCI

Konstruował	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno-Przemysłowy im. J. I. P.
Sprawił	Smyk			
Podzbił	Nazwa			
1:2	Dysza osłowoosymetryczna			Numer 18.01.000

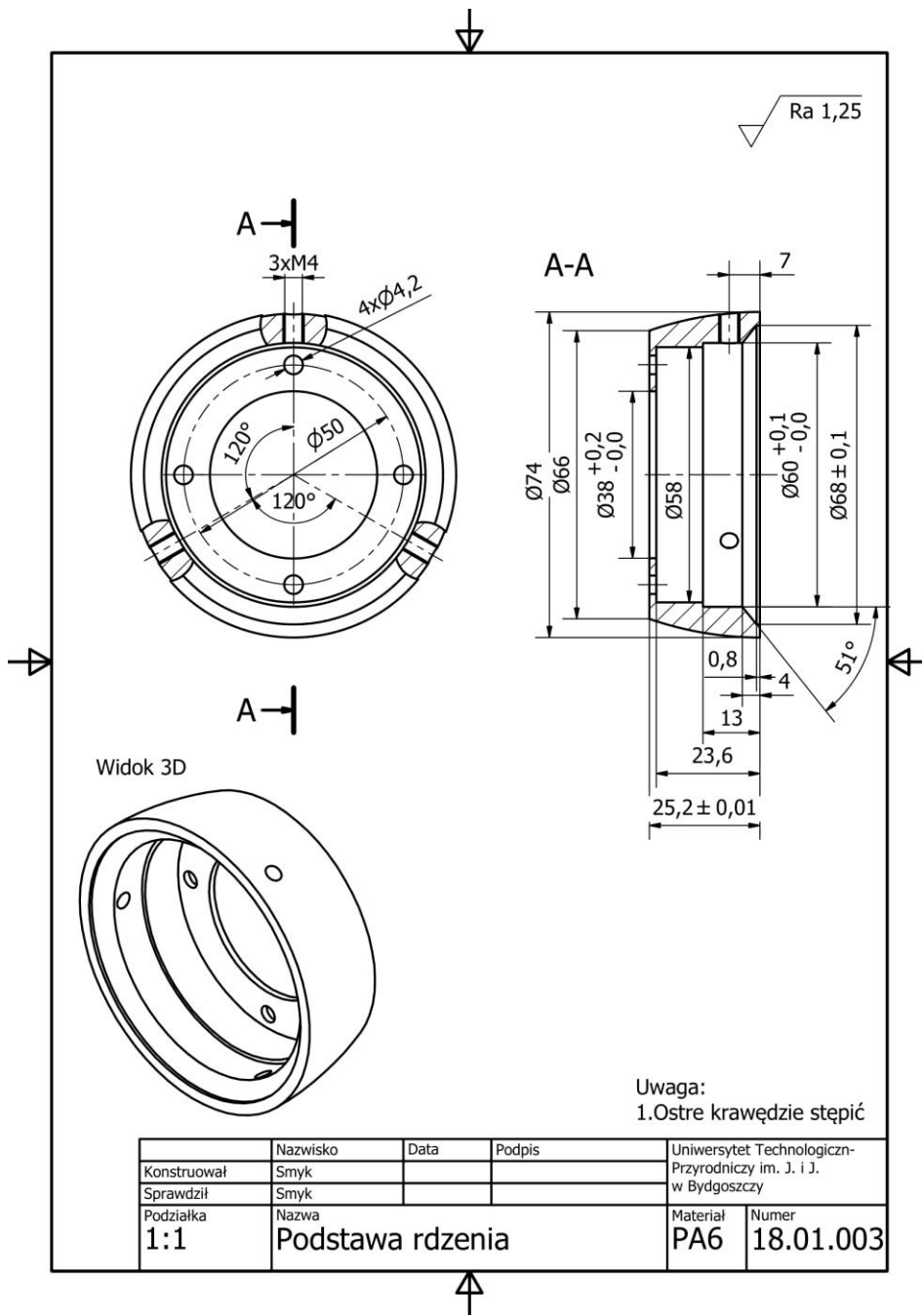


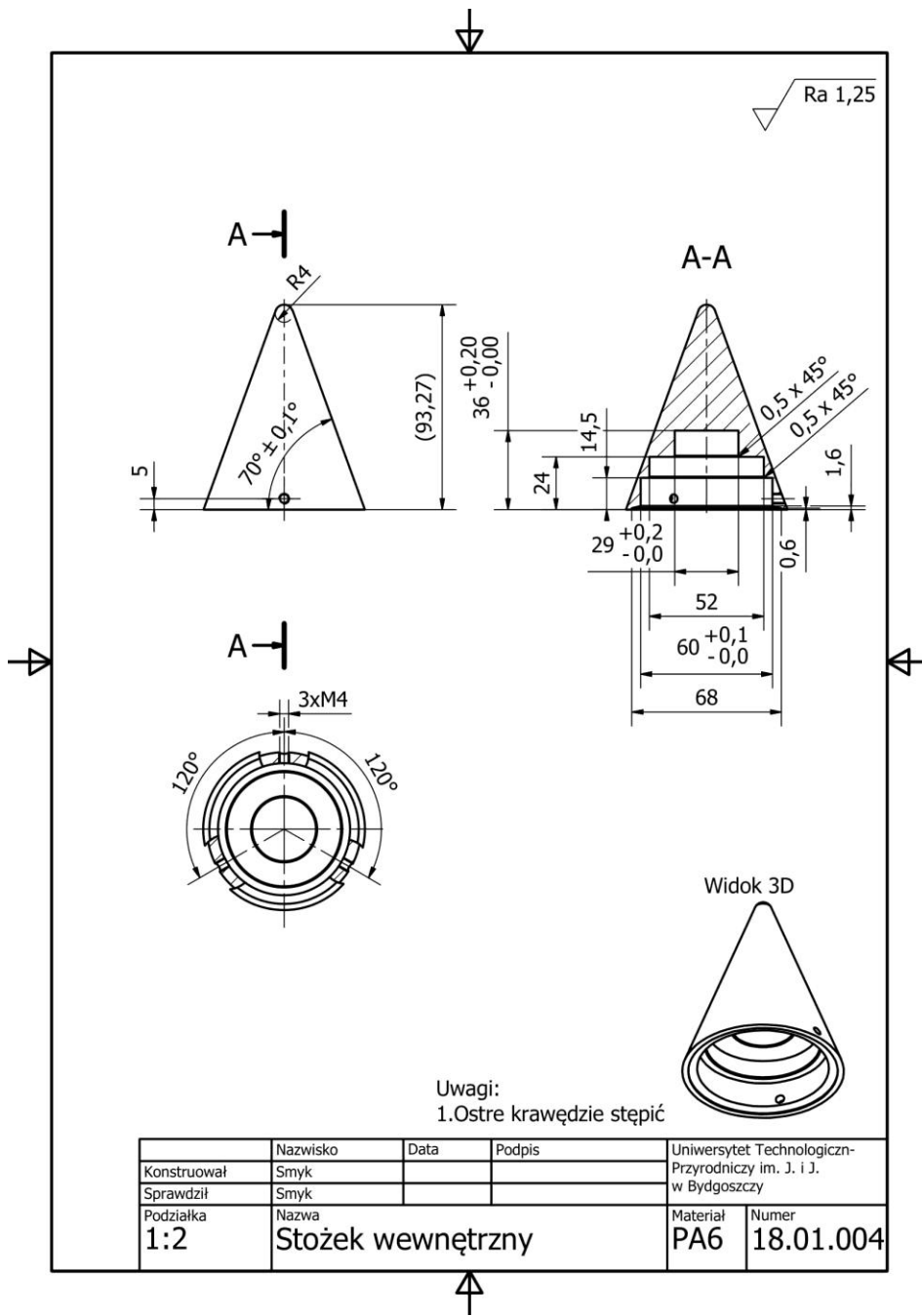
	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. w Bydgoszczy
Konstruował	Smyk			
Sprawdził	Smyk			
Podziałka 1:2	Nazwa Korpus dyszy			Materiał PA6
				Numer 18.01.001

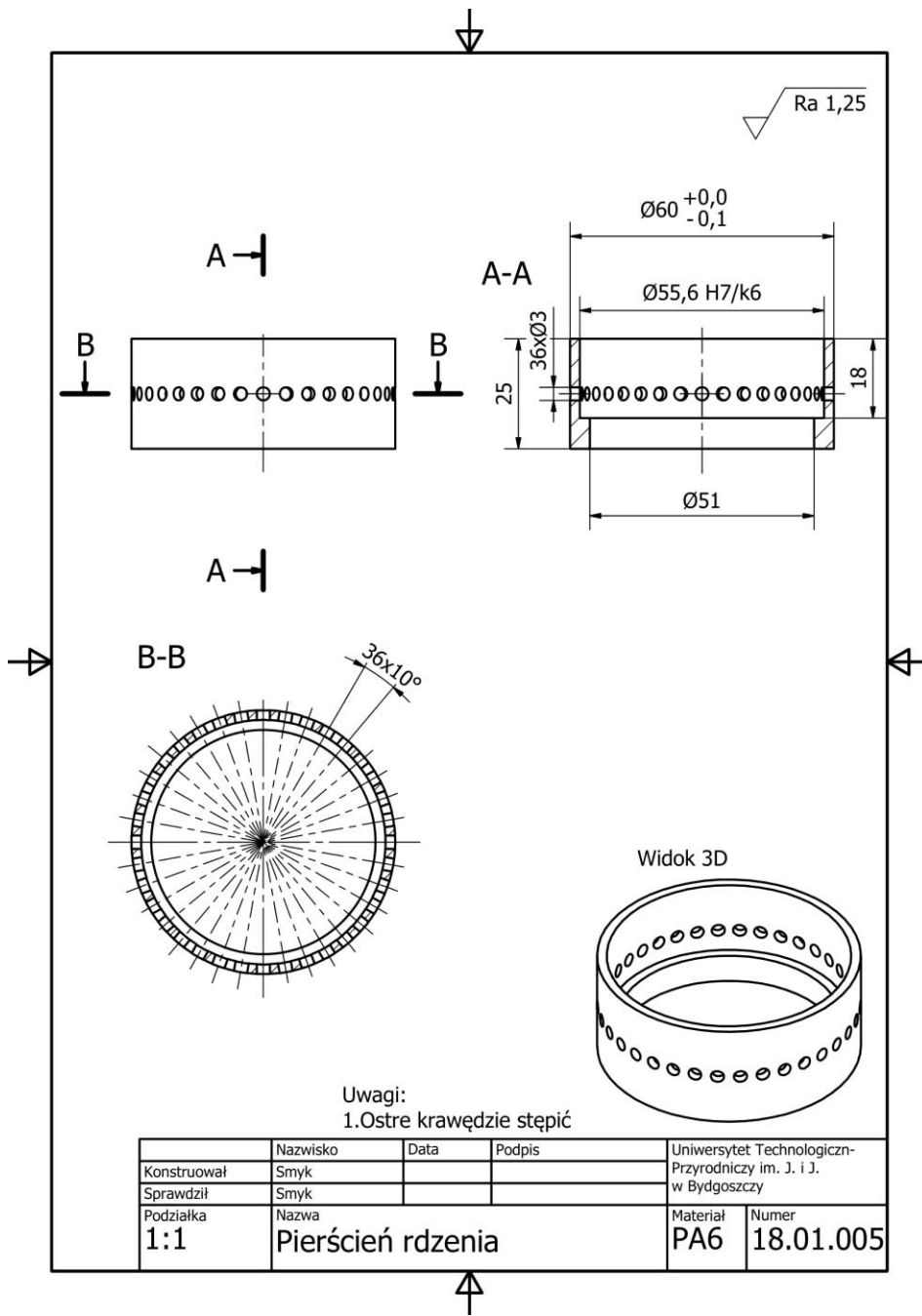


Uwagi:
1. Ostre krawędzie stępić

	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. w Bydgoszczy
Konstruował	Smyk			
Sprawdził	Smyk			
Podziałka 1:1	Nazwa Rdzeń ustalający			Materiał PA6
				Numer 18.01.002

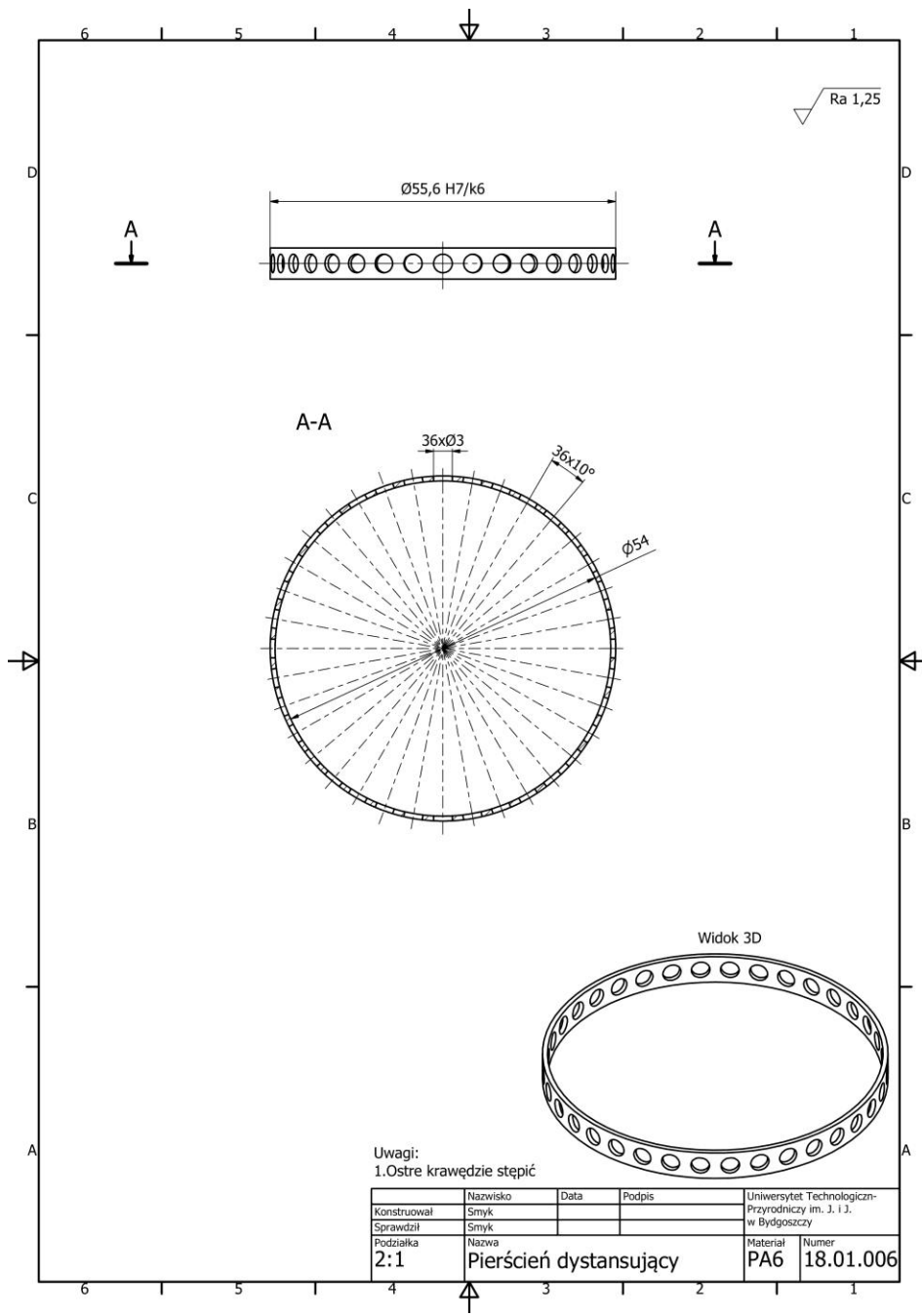






Uwagi:
1. Ostre krawędzie stępić

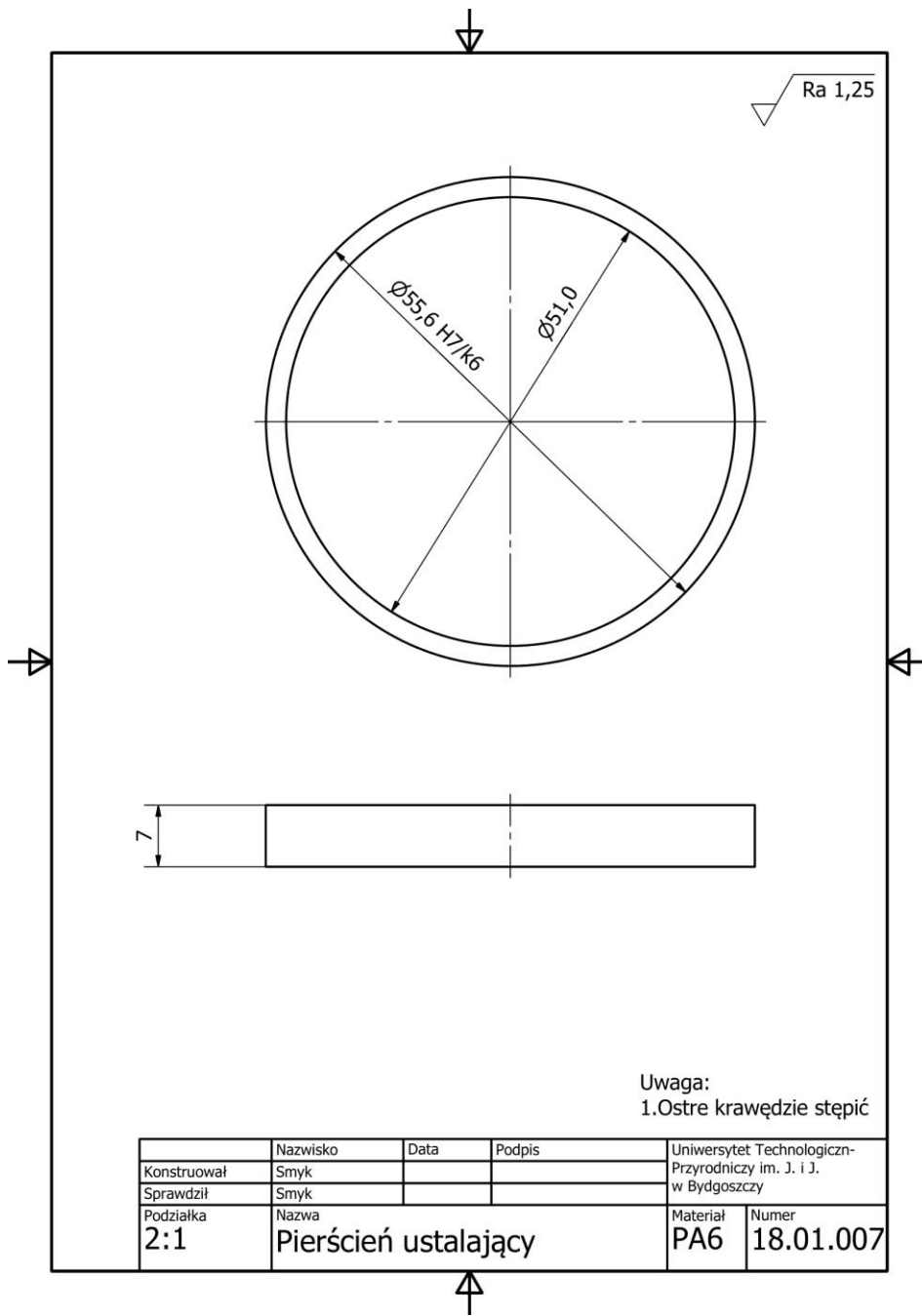
Konstruował	Nazwisko Smyk	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. w Bydgoszczy	
Sprawdził	Smyk				
Podziałka 1:1	Nazwa Pierścień rdzenia			Materiał PA6	Numer 18.01.005



Uwagi:

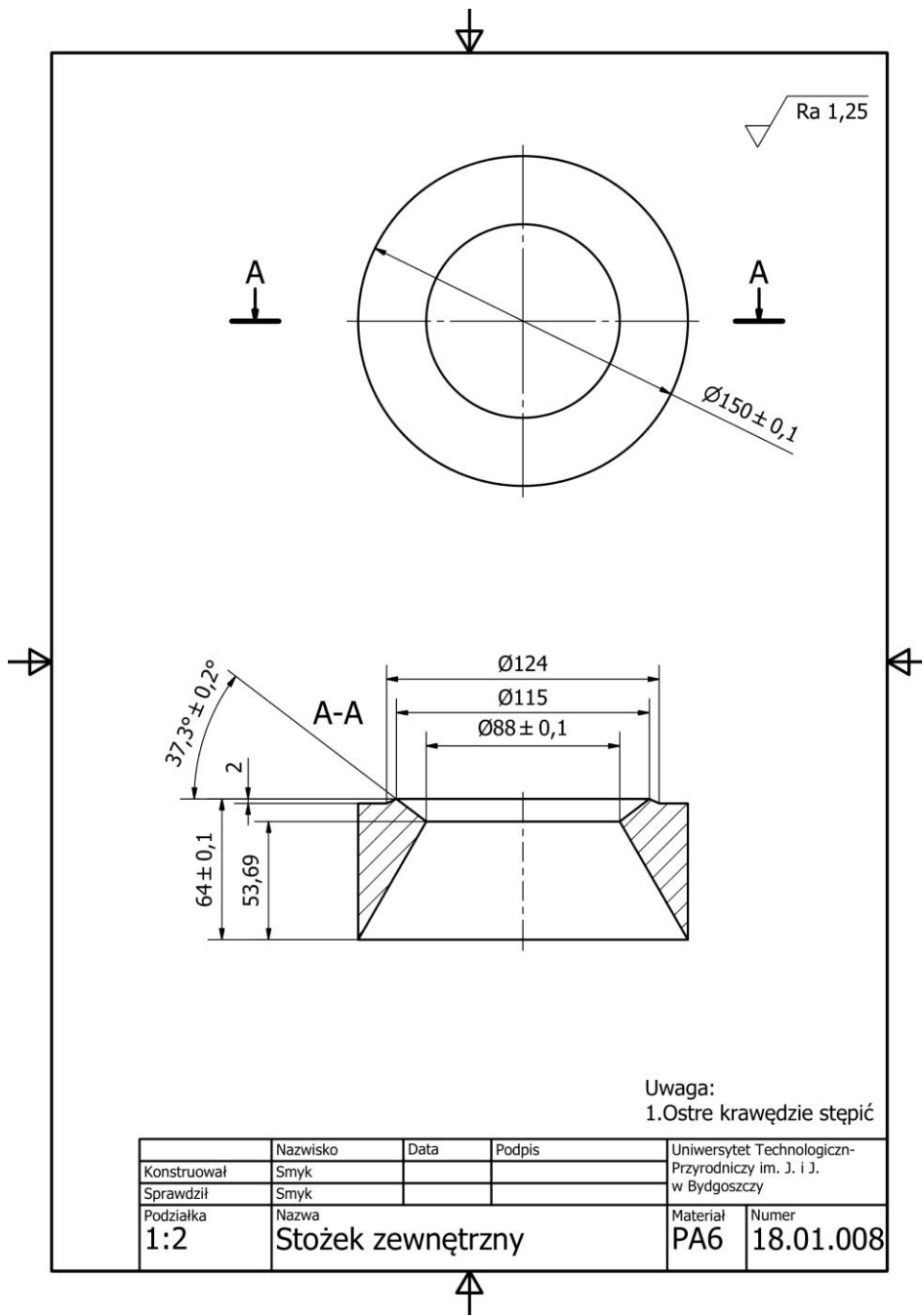
1. Ostre krawędzie stępić

Konstruował	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. I. J. w Bydgoszczy	
Sprawdził	Smyk				
Podziałka	Nazwa			Materiał	Numer
2:1	Pierścień dystansujący			PA6	18.01.006



Uwaga:
1. Ostre krawędzie stępić

	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. w Bydgoszczy
Konstruował	Smyk			
Sprawdził	Smyk			
Podziałka 2:1	Nazwa Pierścień ustalający			Materiał PA6
				Numer 18.01.007



Uwaga:
1. Ostre krawędzie stępić

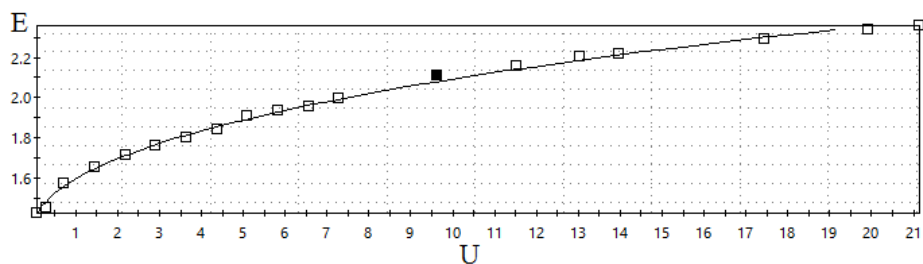
	Nazwisko	Data	Podpis	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J. i J. w Bydgoszczy
Konstruował	Smyk			
Sprawdził	Smyk			
Podziałka 1:2	Nazwa Stożek zewnętrzny		Materiał PA6	Numer 18.01.008

ZAŁĄCZNIK 2.
PRZYKŁADOWA TABLICA KALIBRACYJNA SONDY
55P16 STOSOWANA W PROGRAMIE STREAMWARE
BASICS

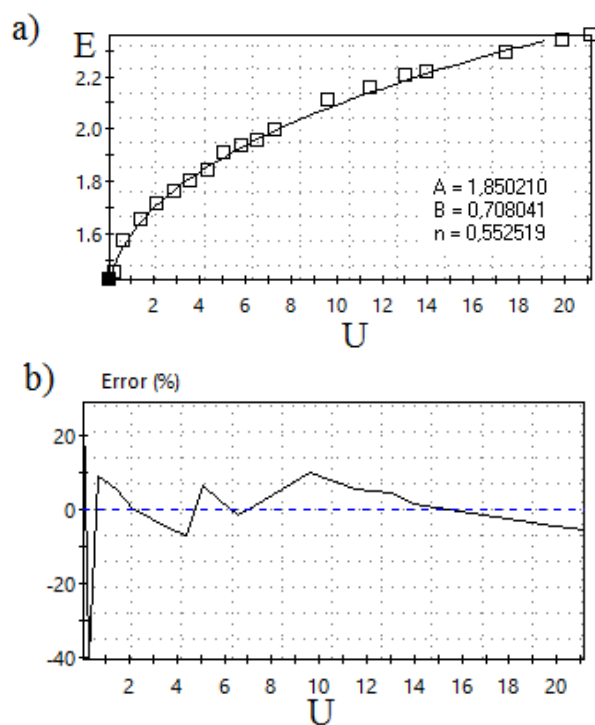
Nr	U , m·s ⁻¹	E_1 , V	T , °C	p , kPa	E_{1corr} , V	U_{cal} , m·s ⁻¹
1	0,2187	1,4429	23,12	101,32	1,4532	0,1596
2	0,2916	1,4559	23,12	101,32	1,4663	0,2128
3	0,7290	1,5729	23,12	101,32	1,5841	0,8406
4	1,4581	1,6540	23,12	101,32	1,6657	1,5343
5	2,1871	1,7150	23,12	101,32	1,7271	2,2193
6	2,9162	1,7640	23,12	101,32	1,7765	2,8657
7	3,6453	1,8049	23,12	101,32	1,8178	3,4671
8	4,3743	1,8409	23,12	101,32	1,8540	4,0374
9	5,1034	1,9110	23,12	101,32	1,9245	5,2541
10	5,8325	1,9370	23,128	101,32	1,9507	5,7429
11	6,5615	1,9589	23,12	101,32	1,9728	6,1735
12	7,7915	2,05800	23,12	101,32	2,0726	8,3512
13	9,6148	2,1110	23,12	101,32	2,1259	9,7441
14	11,5113	2,1600	23,12	101,32	2,1753	11,2463
15	13,0309	2,2019	23,12	101,32	2,2176	12,7569
16	13,9603	2,2160	23,12	101,32	2,2317	13,3170
17	17,4572	2,2920	23,9599	101,32	2,3126986	17,2542
18	19,9315	2,3350	23,9599	101,32	2,3560	20,0157
19	21,1441	2,3570	23,6599	101,32	2,3766	21,5274

Prędkość strumienia U , napięcie na sondzie E_1 , temperatura powietrza T oraz ciśnienie atmosferyczne p określono w czasie kalibracji sondy, Następnie na tej podstawie obliczono parametry E_{1corr} oraz U_{cal} , które były wykorzystywane w czasie pomiarów,

Punkty oraz krzywą kalibracyjną wykreśloną na podstawie tabeli kalibracji przedstawiono rys. 2-1, natomiast analizę błędów oraz dobrane współczynniki kalibracji – na rys. 2-2. Na podstawie tych danych obliczono parametry E_{1corr} oraz U_{cal} .



Rys. 2-1, Krzywa kalibracji, wykreślana w czasie kalibracji sondy, w programie StreamWare Basics



Rys. 2-2. Poprawiona krzywa kalibracji wraz z wyznaczonymi parametrami kalibracji (a), analiza błędów dla obliczonych na tej podstawie wartości (b)

Jak wynika z rys. 2-2, błędy kalibracji są stosunkowo duże, nawet do 40% dla prędkości $U < 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ponadto stosunkowo duży błąd (9,98%)

wykazano dla punktu 14 (tabela kalibracji). Dla pozostałych punktów kalibracji błąd był mniejszy niż 6%. Wynik taki można uznać za zadowalający.

ZAŁĄCZNIK 3. PROGRAM DO OBLICZEŃ PRĘDKOŚCI CHARAKTERYSTYCZNEJ U_0

Poniżej przedstawiono program wraz z opisem poszczególnych jego funkcji, służący do obliczania prędkości charakterystycznej strumieni syntetyzowanych. Program importuje dane z pliku zmiennoprzecinkowego o rozszerzeniu 'csv'. Następnie uśrednia przebieg prędkości do jednego okresu i oblicza prędkość średnią, w funkcji czasu, zmierzoną w danym punkcie oraz zapisuje ją do pliku. Obliczana jest też wartość prędkości charakterystycznej dla pomiaru.

Zmiennymi częściami programu, które trzeba definiować dla każdego przypadku są lokalizacja zapisanego pliku oraz częstotliwość pracy siłownika. Program został napisany w Scilabie.

W przypadku obliczania rozkładu prędkości w dyszy siłownika na podstawie pomiarów przedstawiony poniżej kod był odpowiednio modyfikowany i dostosowany do liczby pomiarów. Jako wynik działania programu zapisywane były 2 pliki o rozszerzeniu 'csv'. Pierwszy – z uśrednionymi przebiegami prędkości w czasie $u(t)$ oraz drugi – z profilem prędkości w dyszy oraz obliczoną na jego podstawie prędkością charakterystyczną w dyszy.

Kod programu:

```
//DANE (dziennik używanych zmiennych)  
// DANE - czas i prędkość z pomiarów  
// fre - częstotliwość strumieni syntetyzowanych (do zdefiniowania)  
// n - liczba próbek  
// v - wektor z prędkościami  
// time - wektor z czasem  
// nf - liczba okresów  
// n_sum - liczba próbek w jednym przebiegu zaokrąglona w dół  
// v_sum - prędkość sumowana  
// t_sum - czas cyklu  
// V_sum - prędkość uporządkowana  
// i_min - punkt w którym znajduje się przejście z ssania w wydmuch -> wartość  
minimalna prędkości  
// i_max - punkt w którym znajduje się wartość maksymalna prędkości -> szczyt  
wydmuchu  
// U0 - prędkość średnia wydmuchu  
// T_sum - cas dostosowany do V_sum  
clear();  
clc();  
//Wczytujemy pomiar  
DANE=csvRead('C:\Users\CTA\Documents\0,PRACA\4,Pomiary\1,Laboratorium  
- pomiary\20170223 - generatory\h15d10ed2\Pomiary\10_1,csv',';',';');
```

```

//Wczytujemy częstotliwość strumieni
fre=10

//tworzenie z DANE 2 wektorów
n=length(DANE(:,1))-1;
for i=2:n+1
    v(i-1)=DANE(i,2);
    time(i-1)=DANE(i,1);
end

nf=fre*time(n);
n_sum=int(n/nf);
v_sum=zeros(n_sum,1);
t_sum=zeros(n_sum,1);

//Sumowanie nf przebiegów do jednego
for i=1:n_sum
    v_sum(i)=v_sum(i)+v(i);
    for j=1:int(nf)
        v_sum(i)=v_sum(i)+v(i+j*n_sum);
    end
    v_sum(i)=v_sum(i)/int(nf+1);
    t_sum(i)=t_sum(i)+time(i);
end

for i=1:n_sum
    if v_sum(i)-min(v_sum)==0 then
        for j=i:n_sum
            V_sum(j-i+1)=v_sum(j);
        end,
        for k=1:i-1
            V_sum(n_sum-i+k)=v_sum(k);
        end,
        break;
    end
end

//określanie i_min
for i_min=1:n_sum
    if V_sum(i_min)-min(V_sum(int(n_sum/3):(n_sum-int(n_sum/3))))==0 then
        break;
    end
end

//określanie i_max
for i_max=1:n_sum
    if V_sum(i_max)-max(V_sum)==0 then

```

```

        break;
    end
end

//definiowanie T_sum
T_sum=0:(1/fre/(length(V_sum)-1)):1/fre;

//
plot(t_sum,v_sum, T_sum, V_sum)
//

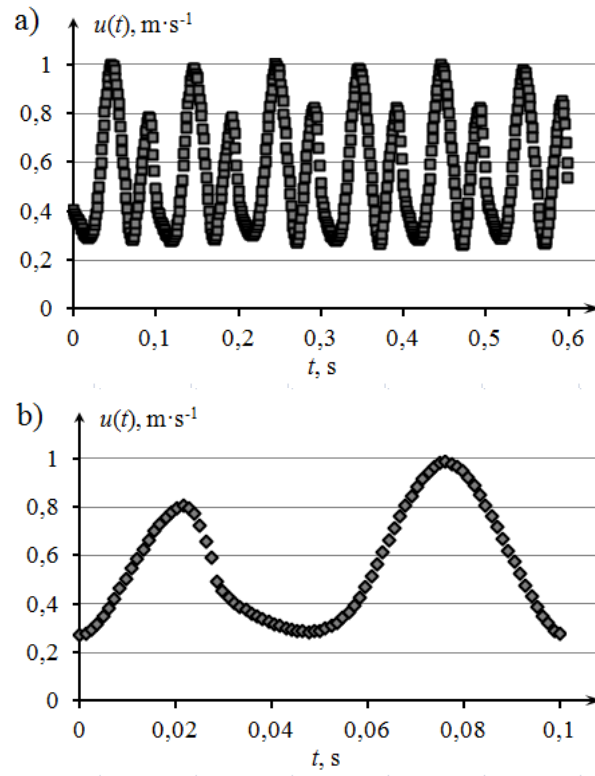
U0=0;
//całkowanie w przód, obliczamy prędkość średnią funkcji
if i_max<i_min then
    for i=1:i_min-1
        U0=U0+(V_sum(i)+V_sum(i+1))/2*(t_sum(i+1)-t_sum(i));
    end
    U0=U0/(t_sum(i_min)-t_sum(1));
else
    for i=i_min:n_sum-2
        U0=U0+(V_sum(i)+V_sum(i+1))/2*(t_sum(i+1)-t_sum(i));
    end
    U0=U0/(t_sum(n_sum)-t_sum(i_min));
end

//zapisujemy do pliku uśredniony przebieg prędkości
csvWrite([T_sum' V_sum],
'C:\Users\CTA\Documents\0,PRACA\4,Pomiary\1,Laboratorium -
pomiary\20170223 - generatory\10v_po_t.csv')

//zapisujemy do pliku prędkość charakterystyczną
csvWrite([U0], 'C:\Users\CTA\Documents\0,PRACA\4,Pomiary\1,Laboratorium -
pomiary\20170223 - generatory\10v_U0.csv')
disp(U0);

```

Na rys. 3-1a przedstawiono przykładowy pomiar prędkości w dyszy. Liczba punktów pomiarowych n oraz częstotliwość próbkowania sygnału f_s odpowiadają przyjętym w pracy założeniom. Na rys. 3-1b przedstawiono uśredniony za pomocą przedstawionego programu, przebieg prędkości w czasie dla jednego okresu pracy siłownika strumieni syntetyzowanych. Przedstawiony profil prędkości odpowiada częstotliwości pracy siłownika $f = 10$ Hz,



Rys. 3-1, Wynik pomiaru prędkości strumieni syntetyzowanych za pomocą anemometru termicznego (a), uśredniony przebieg prędkości w czasie pełnego okresu pracy siłownika strumieni syntetyzowanych, pomiar dla częstotliwości pracy siłownika $f = 10 \text{ Hz}$ (b)

ZAŁĄCZNIK 4.
TABELE OBLICZONYCH WARTOŚCI NATEŻEŃ
PRZEPLYWU

Tabela 1. Wartości objętościowych natężeń przepływu Q_1 , Q_2 oraz sumarycznego natężenie przepływu Q_1+Q_2 dla $Q_{01} = 0,004 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

	$Q_1, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_2, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_1+Q_2, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\left \frac{Q_{01} - (Q_1 + Q_2)}{Q_{01}} \right \cdot 100\%$
$P_0 = 0 \text{ W}$	0,00244	0,00151	0,00395	1,32
$P_1 = 0,5 \text{ W}$	0,00241	0,00195	0,00436	9,11
$P_2 = 1 \text{ W}$	0,00228	0,00198	0,00426	6,48
$P_3 = 2 \text{ W}$	0,00263	0,00262	0,00525	31,25
$P_4 = 3 \text{ W}$	0,00106	0,00658	0,00764	91,01

Tabela 2. Wartości objętościowych natężeń przepływu Q_1 , Q_2 oraz sumarycznego natężenie przepływu Q_1+Q_2 dla $Q_{02} = 0,0025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

	$Q_1, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_2, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_1+Q_2, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\left \frac{Q_{02} - (Q_1 + Q_2)}{Q_{02}} \right \cdot 100\%$
$P_0 = 0 \text{ W}$	0,00135	0,00104	0,00239	4,52
$P_1 = 0,5 \text{ W}$	0,00054	0,00364	0,00418	67,40
$P_2 = 1 \text{ W}$	0,00070	0,00465	0,00535	113,88
$P_3 = 2 \text{ W}$	0,00079	0,00437	0,00516	106,43
$P_4 = 3 \text{ W}$	0,00088	0,00448	0,00535	114,16

Tabela 3. Wartości objętościowych natężeń przepływu Q_1 , Q_2 oraz sumarycznego natężenie przepływu Q_1+Q_2 dla $Q_{03} = 0,018 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

	$Q_1, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_2, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_1+Q_2, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\left \frac{Q_{03} - (Q_1 + Q_2)}{Q_{03}} \right \cdot 100\%$
$P_0 = 0 \text{ W}$	0,00082	0,00103	0,00185	2,75
$P_1 = 0,5 \text{ W}$	0,00048	0,00304	0,00352	95,77
$P_2 = 1 \text{ W}$	0,00039	0,00278	0,00318	76,39
$P_3 = 2 \text{ W}$	0,00053	0,00270	0,00323	79,46
$P_4 = 3 \text{ W}$	0,00080	0,00408	0,00488	171,37

STEROWANIE STRUMIENIEM OSIOWOSYMETRYCZNYM ZA POMOCĄ STRUMIENI SYNTETYZOWANYCH

Streszczenie

Sterowanie przepływem cieczy i gazów jest od wielu lat przedmiotem zainteresowania mechaniki płynów. Strumienie syntetyzowane są stosunkowo mało znanym obszarem mechaniki płynów, jednakże, badania dotyczące ich właściwości i wykorzystania są prowadzone w wielu ośrodkach uniwersyteckim, między innymi w Holandii, Czechach, Chinach i USA. Strumienie syntetyzowane są zastosowanie między innymi w różnego typu zaworach lub rozdzielaczach, któremu to zagadnieniu poświęcona jest ta praca.

Podstawową hipotezą badawczą przedstawionej pracy jest przypuszczenie, że istnieje możliwość sterowania strumieniem głównym w dyszy osiowosymetrycznej za pomocą strumieni syntetyzowanych.

W pracy przedstawiono badania dwuelementowych, akustycznych siłowników syntetyzowanych wykorzystywanych do generowania strumieni sterujących w zaworze osiowosymetryczny, a w szczególności: porównano je do siłowników jednoelementowych; przedstawiono badania możliwości sterowania prędkością generowanych strumieni poprzez zmianę kąta przesunięcia fazowego prądu zasilającego poszczególne elementy wykonawcze; badania parametrów siłowników dwuelementowych w zależności od wartości wybranych cech geometrycznych korpusu siłownika.

Celem weryfikacji hipotezy naukowej przebadani dyszę i zawór osiowosymetryczny, które wykorzystują strumienie syntetyzowane jako strumienie sterujące. W szczególności skupiono się na możliwości sterowania strumieniem głównym i zweryfikowano czy parametry pracy skonstruowanego zaworu spełniają założenia przedstawione w pracy.

Na podstawie rezultatów badań sformowano wnioski końcowe oraz przedstawiono perspektywę dalszych badań.

CONTROL OF AXISYMMETRIC STREAM USING SYNTHETIC JETS

Summary

The control of the flow of liquids and gases has been the focus of fluid mechanics for many years. Synthetic jets are relatively little-known area of fluid mechanics, however, studies on their properties and applications are carried out in many universities centres, for example in Netherlands, the Czech Republic, China and USA.. They are used, among others, in various types of valves and flow separator, it is the subject of this work

The basic hypothesis of the presented work is the assumption that it is possible to control the main stream in the axisymmetric valve using synthetic jets.

The paper presents research on two-element acoustic synthetic jet actuators used to generate control streams in an axisymmetric valve, in particular: they were compared to single-element actuators; presents the control possibilities of the synthetic jet velocity by changing the phase angle of the current feeding individual executive elements; testing of parameters of two-element actuators depending on the value of selected geometric features of the actuator body.

To verify the scientific hypothesis the axisymmetric nozzle and valve were tested, they used synthetic jet as control jet. In particular, it focused on the possibility of main stream control and it was verified whether the operation parameters of the constructed valve meet the assumptions presented in the paper

Based on the results of the research, final conclusions were formulated and the perspective of further research was presented.