

Właściwości dynamiczne układu pomiarowego ciśnienia w przepływie

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów ciśnienia w strudze zaśmigłowej oraz wyniki modelowania metodą CFD. Wyniki symulacji posłużyły do identyfikacji modeli dynamicznych dla dwóch wersji rurki Pitota zastosowanych w układzie pomiarowym. Wyznaczone na tej podstawie charakterystyki częstotliwościowe umożliwiło określenie wpływu charakterystyk dynamicznych rurki Pitota na charakterystykę sygnału uzyskiwanego w układzie pomiarowym.

Abstract. Results of pressure measurements beyond propeller and the results of CFD simulation are experimental part of the paper. Simulation results were used to identify dynamic models for two versions of the Pitot tube used in the measuring system. Frequency responses calculated on this basis made it possible to determine the influence of dynamic characteristics of the Pitot tube on the characteristics of the signal obtained in the measuring system. (**Dynamic properties of the pressure measurement system in flow.**)

Słowa kluczowe: rurka Pitota, charakterystyki dynamiczne, estymacja.

Keywords: Pitot tube, dynamic response, estimation.

Wprowadzenie

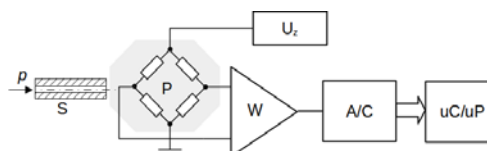
Banalna budowa i prosty związek łączący ciśnienie spiętrzenia z lokalną prędkością przepływu powoduje, że od chwili wynalezienia przez Henriego Pitota w 1732 r. [1] rurka spiętrzeniowa pozostaje jednym z podstawowych przyrządów pomiarowych mechaniki płynów i jako taka pozostaje ciągle w obszarze zainteresowania badaczy zajmujących się metrologią przepływów. Prace te zaowocowały opracowaniem szeregu geometrii rurek spiętrzeniowych i poddaniu ich procesowi standaryzacji. Szereg informacji o statycznej niepewności pomiarowej rurki znaleźć można w pracy [2]. Autor zauważa, że stabilizacja ciśnienia wymaga pewnego czasu, jednak nie poddaje tego faktu analizie. Fakt opóźnienia i deformacji sygnału wyjściowego nie może i nie został niezauważony w odniesieniu do pomiarów niestacjonarnych pól prędkości. Czas i sposób osiągnięcia wartości mierzonej jest szczególnie ważny w przypadku badań zmian prędkości w otoczeniu wirników maszyn przepływowych. Wysoka częstotliwość zmian wartości ciśnienia wynikająca, z jednej strony z przejść łopat tychże wirników, a jednocześnie złożony, wirowy i turbulentny, charakter strumienia płynu powoduje konieczność uwzględnienia charakterystyk dynamicznych układu pomiarowego. Informacje o wpływie przetworników ciśnienia na właściwości dynamiczne ciśnieniowych systemów pomiarowych znaleźć można między innymi w pracach [3, 4, 5].

Przegląd metod i narzędzi pomiarowych dedykowanych do ciśnieniowych badań przepływów szybkozmiennych zaprezentowano w [6]. Zagadnieniom konstruowania i wyznaczania niepewności pomiarowej sond ciśnienia, w ujęciu dynamicznym, poświęcono prace [7, 8]. W artykułach [9,10,11] zagadnienia projektowe połączono z właściwościami metrologicznymi przetworników ciśnienia. Rozwój technik symulacji komputerowych umożliwił również wykorzystanie ich przy identyfikacji dynamiki układów pomiarowych. W pracy [12] przedstawiono porównanie charakterystyk częstotliwościowych rurki Pitota uzyskanych w eksperymentalnym wyznaczeniu pola prędkości za śmigłem [13] i poprzez symulację CFD. Niniejszy artykuł rozszerza zakres badań zaprezentowanych wcześniej o wpływ średnicy sondy na jej odpowiedź dynamiczną.

Struktura układu pomiarowego

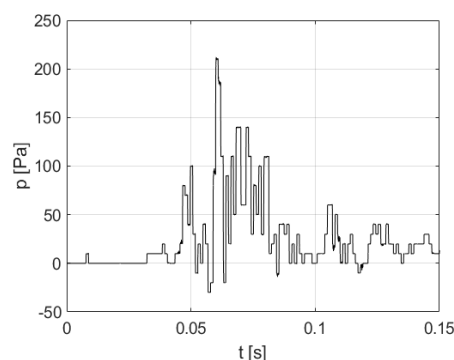
Na rysunku 1 przedstawiono schemat układu pomiarowego ciśnienia składający się z sondy ciśnienia S,

przetwornika piezorezystancyjnego ciśnienia różnicowego P (drugi port na ciśnieniu atmosferycznym) zasilanego ze źródła napięcia referencyjnego U_z , wzmacniacza pomiarowego W, przetwornika analogowo-cyfrowego A/C oraz układu przetwarzającego mikroprocesorowego uP lub komputerowego uC.



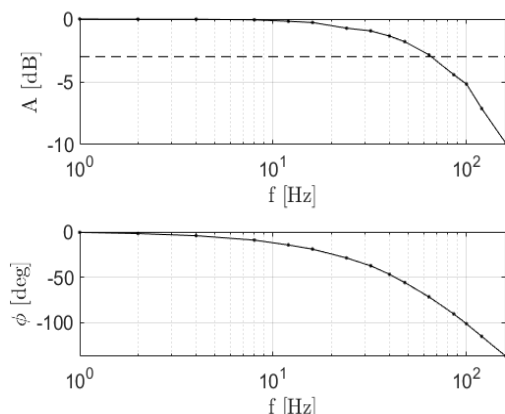
Rys.1. Schemat układu pomiarowego ciśnienia

Zastosowany układ z przetwornikiem bez układów przetwarzających wynika z wniosków z wcześniejszych badań tego typu przetworników. Stosowane powszechnie układy przetwarzające wykorzystują cyfrowe algorytmy, które realizują kalibrację i kompensację temperaturową, redukując tym samym wrażliwość na temperaturę. Niestety w tego rodzaju przetwornikach sygnał wyjściowy ma cechy sygnału próbkowanego nawet, wtedy gdy jest to przetwornik z wyjściem analogowym. Na rysunku 2 zaprezentowano przebieg sygnału wyjściowego z przykładowego przetwornika. Zbyt mała częstotliwość próbkowania skutkuje brakiem możliwości określenia rzeczywistego kształtu przebiegu ciśnienia.



Rys.2. Przebieg sygnału wyjściowego z przetwornika ciśnienia z sondą ciśnienia całkowitego przy przejściu przez podmuch

Aby umożliwić poprawne odtworzenie charakterystyk dynamicznych, przyjęto pasmo wzmacniacza około 70 kHz. Wyniki badania wzmacniacza zaprezentowane w formie charakterystyk częstotliwościowych (rysunek 3) potwierdzają spełnienie założenia projektowego.



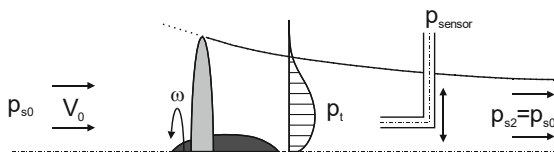
Rys.3. Charakterystyki częstotliwościowe wzmacniacza pomiarowego

Dla realizacji badania przetwarzanie analogowo-cyfrowe i rejestrację wyników pomiaru wykonano za pomocą komputerowego systemu pomiarowego z modułem pomiarowym o próbkowaniu 400 kHz (wykorzystując 200 kHz na kanał ze względu na pomiar obrotów na podstawie zarejestrowanych przebiegów napięcia z czujnika laserowego podłączonego do drugiego kanału).

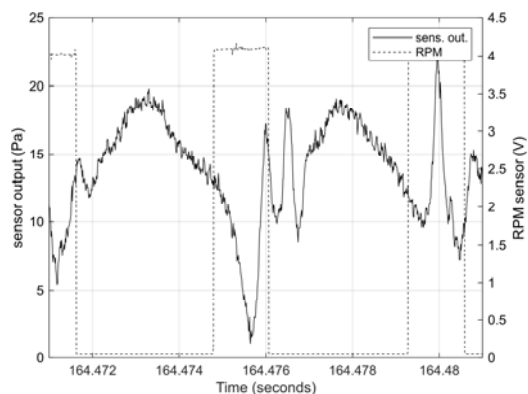
Badanie strugi zaśmigłowej

Pomiar ciśnienia w strudze zaśmigłowej przeprowadzono na przygotowanym uprzednio stanowisku zawierającym zespół napędowy, układ pomiaru ciśnienia. Zespół napędowy składa się z silnika elektrycznego z zamocowanym do wału śmigłem. Na rysunku 4 pokazana została ogólna idea pomiaru. Rurka Pitota z przetwornikiem pomiarowym ciśnienia różnicowego z możliwością sterowania położeniem w strudze umożliwia skanowanie rozkładu przestrzennego ciśnienia. Więcej szczegółów dotyczących metody pomiaru i budowy stanowiska pomiarowego zostało zamieszczone w publikacjach [12,13]. System pomiarowy składa się z przetwornika ciśnienia podłączonego do mikrokontrolera. Przetwornik pomiarowy nie jest używany w sposób bezpośredni, ponieważ ze względu na swój rozmiar będzie powodował zaburzenie przepływu, a co za tym idzie, wpływał na wyniki pomiarów. Żeby zminimalizować wpływ układu pomiarowego na wielkość mierzoną do przetwornika dołączono rurkę Pitota. Ponieważ we wcześniejszym badaniu zaobserwowany został wpływ rurki na charakterystyki dynamiczne [12] więc w celu zbadania wpływu średnicy wewnętrznej rurki na charakterystyki układu pomiarowego przeprowadzono badania dwu wersji, o wymiarach:

- 1) średnica zewnętrzna 2 mm i wewnętrzna 1,3 mm,
- 2) średnica zewnętrzna 2 mm i wewnętrzna 0,6 mm.



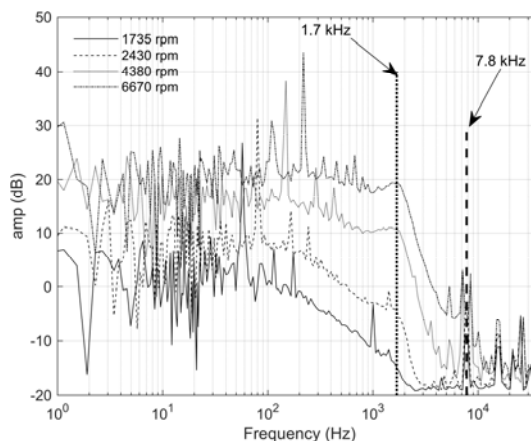
Rys.4. Zobrazowanie strugi zaśmigłowej z umieszczoną w niej rurką Pitota



Rys.5. Fragment zarejestrowanego sygnału czujnika ciśnienia i czujnika prędkości obrotowej.

Po zmontowaniu stanowiska dokonano pomiarów, stosując opisane wyżej rurki probiercze i rejestrując parametry ciśnienia panujące w strudze zaśmigłowej dla kilku wybranych prędkości obrotowych śmigła. Na rysunku 5 pokazano fragment zarejestrowanego sygnału pochodzącego z czujnika ciśnienia i czujnika prędkości obrotowej, który jednocześnie pozwalał na synchronizację sygnału ciśnienia w strudze z położeniem łopaty śmigła.

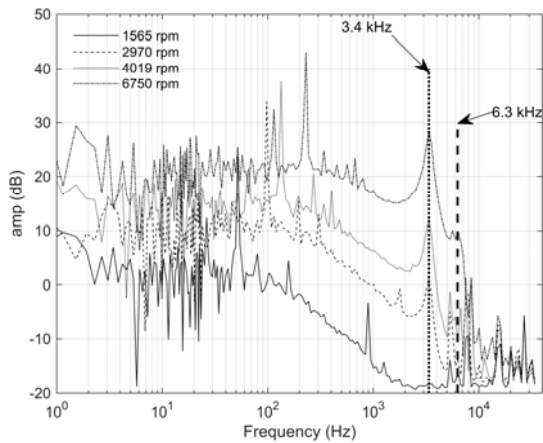
Widmo częstotliwościowe zarejestrowanego sygnału ciśnienia dla rurki 2) pokazano na rysunku 6. Do analizy przyjęto cztery prędkości obrotowe śmigła 1735 obr/min, 2430 obr/min, 4380 obr/min, 6670 obr/min.



Rys.6. Odpowiedź częstotliwościowa rurki pomiarowej o średnicy wewnętrznej 0,6 mm.

Na kolejnym rysunku 7 zostało pokazane widmo częstotliwościowe pomiaru ciśnienia z rurką 1). Do analizy również zostały przyjęte cztery wybrane prędkości obrotowe o wartościach 1565 obr/min, 2970 obr/min, 4019 obr/min, 6750 obr/min. Na poniższych rysunkach można zaobserwować wiele różnych składowych częstotliwościowych, które pochodzą od pracy śmigła, ale również wszelkiego rodzaju zakłócenia wynikające z pracy zespołu napędowego, zakłócenia przepływu strugi i zakłócenia wynikające z pracy przetwornika ciśnienia.

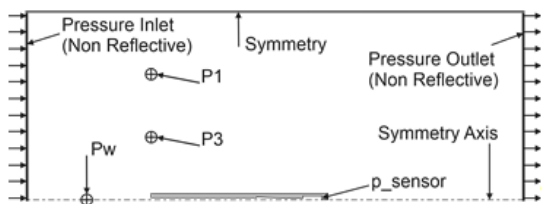
Można też postawić pytanie, jaki wpływ na pomiar zmiennego ciśnienia ma zastosowana rurka? Stwierdzenie faktu wpływu rurki pomiarowej na wyniki pomiaru ciśnienia nie jest możliwe bezpośrednio, ponieważ przy próbie pomiaru ciśnienia na wlocie rurki pojawi się problem dodatkowego zaburzenia i zmiany otrzymanych wyników pomiaru. Problem zbadania wpływu toru pomiaru ciśnienia (rurka pomiarowa) może być zrealizowany pośrednio poprzez wykonanie modelowania przepływu, a następnie porównania wyników.



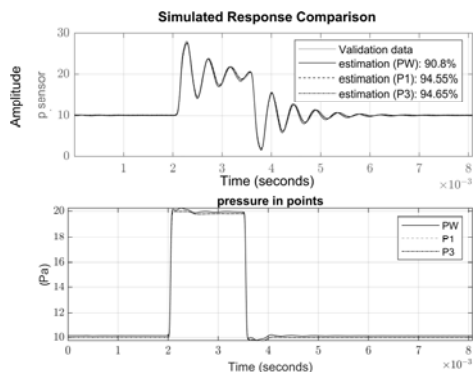
Rys.7. Odpowiedź częstotliwościowa rurki pomiarowej o średnicy wewnętrznej 1,3 mm.

Modelowanie sondy ciśnienia

Do stworzenia modelu dynamiki rurki wykonano model CFD szczegółowo opisany w [12,13]. Modelowanie przepływu zostało wykonane w programie Ansys/Fluent. Wykorzystano osiowo symetryczną siatkę niestrukturalną z modelem turbulencji k- ω SST. Jako medium przyjęto powietrze jako płyn izentropowy ściśliwy i lepki. Przyjętą geometrię domeny i warunki brzegowe zaprezentowano na rysunku 8. Rejestrację wartości ciśnienia dokonano w czterech punktach pokazanych na rysunku 8, są to trzy punkty, w których rejestrowane jest ciśnienie, które powinno zostać zmierzone i ciśnienie, jakie występuje przed membraną czujnika pomiarowego. Trzy punkty, w których rejestrowane jest ciśnienie występujące w strudze, zostały przyjęte ze względu na uwzględnienie wpływu umieszczonego systemu pomiarowego na zmiany pola ciśnienia w strudze. Jeżeli możliwe byłoby założenie, że wprowadzenie rurki pomiarowej nie powoduje żadnych zmian ciśnienia w strudze, to punktem pomiarowym powinien być wlot rurki pomiarowej, jednak sama obecność rurki powoduje zakłócenie przepływu.



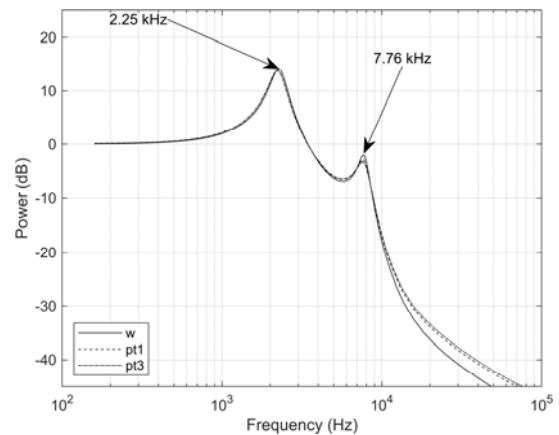
Rys.8. Schemat domeny obliczeniowej.



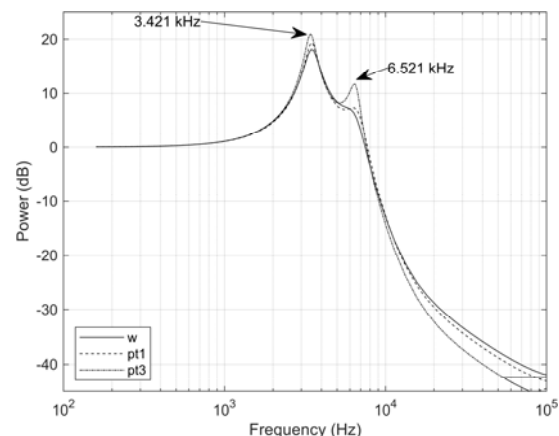
Rys.9. Wyniki estymacji modelu dynamiki rurki pomiarowej (średnica 0,6 mm).

W wyniku przeprowadzonego modelowania przepływu powietrza w strudze zaśmigłowej otrzymano pokazany na rysunku 9 przebieg wartości ciśnienia w wybranych punktach (rysunek 8). Na dolnym przebiegu (rysunek 9) przedstawiono wartości ciśnienia występujące w otoczeniu rurki pomiarowej (punkty P1, P3, Pw). Na górnym wykresie pokazano wartość ciśnienia rejestrowaną przez przetwornik pomiarowy (Validation data).

Przedstawione dane zostały wykorzystane do przeprowadzenia estymacji modelu dynamiki rurki pomiarowej. Do estymacji został użyty estymator zaimplementowany w postaci polecenia *n4sid* zawartego w przyborniku *System Identification* pakietu *Matlab* [14,15,16]. Wyniki estymacji modelu rurki o średnicy wewnętrznej 0,6 mm zostały przedstawione na rysunku 9, analogiczne wyniki otrzymano w przypadku modelowania rurki o średnicy 1,3 mm. W wyniku estymacji otrzymano trzy modele dyskretne, gdzie wejściem są odpowiednio sygnały ciśnienia P1, P3 i Pw, a wyjściem wartości ciśnienia p_sensor. Właściwości dynamiczne tak otrzymanych modeli zostały przedstawione na rysunku 10 dla rurki o średnicy wewnętrznej 0,6 mm, a na rysunku 11 dla rurki o średnicy wewnętrznej 1,3 mm.



Rys.10. Widmo modelu dynamicznego rurki 2 (0,6 mm).



Rys.11. Widmo modelu dynamicznego rurki 1 (1,3 mm).

Analiza wyników

W wyniku modelowania został uzyskany model dynamiki przepływu powietrza w rurce pomiarowej. Na rysunkach 10 i 11 pokazano widmo częstotliwościowe uzyskanego modelu odpowiednio dla rurki o średnicy wewnętrznej 0,6 mm (rysunek 10) i o średnicy wewnętrznej 1,3 mm (rysunek 11). Częstotliwości własne dla rurki o średnicy wewnętrznej 1) 1,3 mm wynoszą $f_1 = 3,421$ kHz, $f_2 = 6,521$ kHz,

2) 0,6 mm wynoszą $f_1 = 2,25$ kHz, $f_2 = 7,76$ kHz.

Na rysunkach 6 i 7 pokazano analizę częstotliwościową sygnału ciśnienia panującego w strudze zaśmigłowej zarejestrowanego przy pomocy dwu rodzajów rurek pomiarowych. W zakresie niskich częstotliwości widoczne są częstotliwości podstawowe wynikające z prędkości obrotowej śmigła i kolejne harmoniczne oraz inne częstotliwości związane z nierównomiernością obrotu silnika napędzającego śmigło, zaburzeniami przepływu powietrza i szumem układu pomiarowego. Częstotliwości własne rurki pomiarowej wyznaczone na podstawie badań rzeczywistych dla rurki o średnicy:

1) 1,3 mm wynoszą $f_1 = 3,4$ kHz, $f_2 = 6,3$ kHz,

2) 0,6 mm wynoszą $f_1 = 1,7$ kHz, $f_2 = 7,8$ kHz.

Porównując uzyskane wyniki z modelem uzyskanym w wyniku symulacji CFD, można zauważyć wysoką zgodność wartości częstotliwości własnych. W przypadku rurki o średnicy 0,6 mm występuje rozbieżność częstotliwości własnej f_1 pomiędzy wynikami uzyskanymi w eksperymencie praktycznym i symulacji (1,7 kHz – eksperyment, 2,25 kHz – symulacja).

Wnioski

Problem wyznaczenia wpływu rurki pomiarowej na wyniki pomiarów jest trudny do określenia na podstawie jedynie danych doświadczalnych, co związane jest brakiem możliwości skutecznego określenia wartości ciśnienia w dwóch kluczowych punktach rurki pomiarowej. W artykule pokazano metodę pośrednią, gdzie korzystając z danych uzyskanych z zastosowaniem metod numerycznego modelowania, można potwierdzić pochodzenie składowych częstotliwościowych w widmie zarejestrowanego sygnału pomiarowego.

Stwierdzona rozbieżność wartości pierwszego modu przy małej średnicy rurki wymaga dalszych badań w zakresie określenia warunków modelowania zachowania się powietrza wewnątrz rurki.

Autorzy: dr hab. inż. Jacek Pieniążek, E-mail: Jacek.Pieniazek@prz.edu.pl; dr inż. Piotr Ciecinski, E-mail: Piotr.Ciecinski@prz.edu.pl; dr inż. Marek Szumski, E-mail: Marek.Szumski@prz.edu.pl; Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów.

LITERATURA

- [1] Pitot, Henri., Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux, *Mémoires de L'Académie* 1732 (1732)..
- [2] Choi, Y.M.; Terao, Y.; Kurihara, N.; Iwai, A.; Funaki, T.; Kang, W.; Nguyen, D.T. Revisit the Pitot Static Tubes in the Standards, *Flow Measurement and Instrumentation* 2021, 82, 102074, doi:10.1016/j.flowmeasinst.2021.102074.
- [3] Kozmar, H.; Laschka, B. Pressure Tap Cavity for Unsteady Aerodynamic Pressure Measurements, *Measurement* 2019, 132, 282–291, doi:10.1016/j.measurement.2018.09.056.

- [4] Szczerba, Z.; Szczerba, P.; Szczerba, K. Sensitivity of Piezoresistive Pressure Sensors to Acceleration, *Energies* (Basel) 2022, 15, doi:10.3390/EN15020493.
- [5] Sanchez, K.; Achour, B.; Coustou, A.; Lecestre, A.; Charlot, S.; Lavayssière, M.; Lefrançois, A.; Aubert, H.; Pons, P. Transient Response of Miniature Piezoresistive Pressure Sensor Dedicated to Blast Wave Monitoring, *Sensors* 2022, 22, doi:10.3390/S22249571.
- [6] Lepicovsky, J.; Simurda, D. Past Developments and Current Advancements in Unsteady Pressure Measurements in Turbomachines, *J Turbomach* 2018, 140, doi:10.1115/1.4040419.
- [7] Chasoglou, A.C.; Mansour, M.; Kalfas, A.I.; Abhari, R.S. A Novel 4-Sensor Fast-Response Aerodynamic Probe for Non-Isotropic Turbulence Measurement in Turbomachinery Flows, *Journal of the Global Power and Propulsion Society* 2018, 2, UALS07, doi:10.22261/JGPPS.UALS07.
- [8] Duquesne, P.; Deschênes, C.; Iliescu, M.; Ciocan, G.D. Calibration in a Potential Water Jet of a Five-Hole Pressure Probe with Embedded Sensors for Unsteady Flow Measurement, *In Proceedings of the Fourth International Conference on Experimental Mechanics*; Quan, C., Qian, K., Asundi, A.K., Chau, F.S., Eds.; December 4 2009.
- [9] Gossweiler, C.R.; Kupferschmid, P.; Gyarmathy, G. On Fast-Response Probes: Part 1 — Technology, Calibration and Application to Turbomachinery, *In Proceedings of the Volume 5: Manufacturing Materials and Metallurgy; Ceramics; Structures and Dynamics; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; General; American Society of Mechanical Engineers*, June 13 1994.
- [10] Humm, H.J.; Gossweiler, C.R.; Gyarmathy, G. On Fast-Response Probes: Part 2 — Aerodynamic Probe Design Studies, *In Proceedings of the Volume 5: Manufacturing Materials and Metallurgy; Ceramics; Structures and Dynamics; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; General; American Society of Mechanical Engineers*, June 13 1994.
- [11] Schlienger, J.; Pfau, A.; Kalfas, A.I.; Abhari, R.S. Measuring Unsteady 3D Flow With a Single Pressure Transducer, *In Proceedings of the The 16th Symposium on Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines*, CAMBRIDGE, UK; 2002.
- [12] Pieniążek, J.; Ciecinski, P.; Ficek, D.; Szumski, M. Dynamic Response of the Pitot Tube with Pressure Sensor, *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 2843 2023, 23, 2843, doi:10.3390/S23052843.
- [13] Pieniazek, J.; Ciecinski, P. Measurement System for Small Propeller Propulsion, *In Proceedings of the 2021 IEEE 8th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace); IEEE*, June 23 2021; pp. 687–691.
- [14] Van Overschee, P.; De Moor, B. Subspace Identification for Linear Systems; *Springer US: Boston, MA*, 1996; ISBN 978-1-4613-8061-0.
- [15] Verhaegen, M. Identification of the Deterministic Part of MIMO State Space Models given in Innovations Form from Input-Output Data, *Automatica* 1994, 30, 61–74, doi:10.1016/0005-1098(94)90229-1.
- [16] Van Overschee, P.; De Moor, B. N4SID: Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic-Stochastic Systems, *Automatica* 1994, 30, 75–93, doi:10.1016/0005-1098(94)90230-5.