

Witold Mickiewicz

**METROLOGIA
I PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW
W OBRAZOWANIU
WEKTOROWEGO POLA AKUSTYCZNEGO**

SZCZECIN 2019

Recenzenci
WOJCIECH BATKO
STEFAN WEYNA

Korekta
WOJCIECH MARKOWSKI

WYDANO ZA ZGODĄ REKTORA ZACHODNIOPOMORSKIEGO
UNIwersYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE

ISBN 978-83-7663-290-2

Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
70-311 Szczecin, al. Piastów 50, tel. 91 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl
Druk PPH Dmochowski, Sobczyk, Spółka jawna
71-062 Szczecin, al. Piastów 42, tel. 91 449 49 23, e-mail: zarzad@zapol.com.pl

Spis treści

Wykaz oznaczeń i akronimów	7
Wstęp	11
Rozdział 1. Podstawowe pojęcia akustyki skalarnej i wektorowej	19
Wprowadzenie	19
1.1. Ciśnienie akustyczne i prędkość akustyczna	21
1.2. Parametry energetyczne pola akustycznego	23
1.2.1. Natężenie dźwięku i moc akustyczna	23
1.2.2. Rozkład częstotliwościowy wartości chwilowej natężenia dźwięku w stacjonarnym polu akustycznym	27
1.2.3. Wirowość natężenia dźwięku	29
Zakończenie	32
Rozdział 2. Modelowanie zjawisk akustycznych	33
Wprowadzenie	33
2.1. Modelowanie numeryczne w mechanice płynów i aeroakustyce	35
2.1.1. Równania mechaniki płynów	35
2.1.2. Przepływy zaburzone i turbulencyjne	38
2.1.3. Metody CFD w aeroakustyce	41
Zakończenie	47
Rozdział 3. Cyfrowe przetwarzanie sygnału w pomiarach i obrazowaniu pól akustycznych	49
Wprowadzenie	49
3.1. Analiza widmowa i filtracja	50
3.2. Dekompozycja POD	54
3.3. Dekompozycja fal monochromatycznych i złożonych w akustycznym polu swobodnym	58
3.3.1. POD przepływu fali płaskiej	59
3.3.2. POD przepływów fali płaskiej złożonych z dwóch tonów	60
Zakończenie	65
Rozdział 4. Zautomatyzowana analiza wektorowego pola akustycznego z wykorzystaniem sondy natężeniowej	67
Wprowadzenie	67

4.1. Współczesne metody pomiaru natężenia dźwięku	68
4.1.1. Sonda natężeniowa p-p	68
4.1.2. Sonda natężeniowa p-u z anemometrycznym przetwornikiem ultradźwiękowym	70
4.1.3. Sonda natężeniowa p-u z anemometrycznymi przetwornikiem o gorących drutach	70
4.2. Analiza dokładności wyznaczania kierunku przepływu energii akustycznej z wykorzystaniem sondy natężeniowej	73
4.3. Zautomatyzowany system do pomiarów akustycznego pola wektorowego na bazie LabView	75
4.4. SIWin – narzędzie programowe do obróbki danych	78
4.4.1. Ortogonalna dekompozycja częstotliwościowo-przestrzenna akustycznego pola wektorowego	79
Zakończenie	82

Rozdział 5. Jednomikrofonowy system do uproszczonych pomiarów natężenia dźwięku	83
Wprowadzenie	83
5.1. Idea metody	84
5.2. Algorytm zwiększenia dokładności synchronizacji kolejnych pomiarów	86
5.3. Synchroniczny jednomikrofonowy pomiar kierunkowej odpowiedzi impulsowej	89
Zakończenie	92

Rozdział 6. Laserowa anemometria obrazowa w akustyce	93
Wprowadzenie	93
6.1. Laserowa anemometria dopplerowska LDV	94
6.2. Laserowa anemometria obrazowa PIV – zasada działania	97
6.3. Metody wyznaczania prędkości przepływu w technice PIV	100
6.4. Elementy systemu PIV	101
6.4.1. Kamery cyfrowe	101
6.4.2. Laserowe źródła światła	102
6.4.3. Optyczny układ noża świetlnego	105
6.4.4. Cząstki wskaźnikowe i ich dobór	106
6.5. Obrazowanie chwilowych wartości prędkości cząstki akustycznej – PIV z synchronizacją fazy	109
6.6. Analiza metrologiczna PIV	111
6.7. Błąd systematyczny wyznaczania prędkości akustycznej techniką PIV i jego korekcja	113
6.7.1. Błędy wizualizacji pola prędkości akustycznej prowadzonej techniką PIV	113

6.7.2. Model błędu systematycznego wyznaczania prędkości akustycznej techniką PIV	115
6.7.3. Procedura korekcji amplitudy i fazy danych pomiarowych przy wymuszeniu akustycznym wąskopasmowym	117
6.8. Obrazowanie emisji harmonicznej fali akustycznej z falowodu . . .	120
6.9. Obrazowanie rejonu generacji fali akustycznej w puszczalce organowej jako przykład obrazowania mechanizmu generacji aeroakustycznej	123
6.10. Odcinkowe obrazowanie wartości skutecznej pola prędkości akustycznej	127
Zakończenie	129
Rozdział 7. Wizualizacja wektorowych zdarzeń akustycznych na płaszczyźnie i w przestrzeni 3D	131
Wprowadzenie	131
7.1. Głośniki	131
7.2. Silnik elektryczny	135
7.2.1. Silnik elektryczny jako źródło hałasu	135
7.2.2. Metoda badań i wyniki	137
7.3. Badania akustyczne prototypu transformatora energetycznego o mocy 75 MVA firmy ABB	141
7.3.1. Cel badań	141
7.3.2. Opis metodyki pomiarów i analiz	141
7.4. Badania akustyczne telekomunikacyjnej szafy zewnętrznej	145
7.4.1. Cel badań	145
7.4.2. Wyniki badań prowadzonych techniką natężeniową	147
7.4.3. Wnioski	148
7.5. Metody natężeniowe w wibroakustycznej ochronie statków	149
7.6. Obrazowanie pola natężenia dźwięku wokół aerofonu	153
Zakończenie	154
Podsumowanie i wnioski końcowe	155
Bibliografia	161
Summary	169