

dr hab. inż. Mirosław Szmajda, prof. uczelni
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Katedra Automatyki
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole
m.szmajda@po.edu.pl

Opole, 15 września 2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Raczyńskiego

Promotor: dr hab. inż. Witold Mickiewicz, prof. ZUT

Dyscyplina naukowa: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

1. WSTĘP I PODSTAWA PRAWNA

Recenzja została zlecona przez Prorektora ds. Nauki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie w piśmie o znaku WE/4120/747/2022 z dnia 28.06.2022 r. w oparciu o dokumentację, w skład której wchodzi:

- rozprawa doktorska pt.: „Wyznaczanie natężenia dźwięku na podstawie synchronizowanych przebiegów ciśnienia akustycznego”, której promotorem jest dr hab. inż. Witold Mickiewicz, prof. ZUT.

Recenzja dotyczy postępowania w przewodzie doktorskim wszczętego w dyscyplinie Elektrotechnika, co wg obecnych uwarunkowań prawnych, określonych w rozporządzeniu MNiSW z dnia 2018 r. w sprawie dziedzin i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. 2018, poz. 1818) odpowiada dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

2. OCENA FORMALNA PRACY

Praca doktorska pt.: „Wyznaczanie natężenia dźwięku na podstawie synchronizowanych przebiegów ciśnienia akustycznego” obejmuje 170 stron i składa się z 10 zasadniczych rozdziałów oraz bibliografii z wykazem 108 prac. Praca jest uzupełniona: streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem ważniejszych oznaczeń i akronimów, wstępem, spisem rysunków, spisem tabel. Praca jest napisana w języku polskim i zorganizowana jak poniżej:

- nienumerowany rozdział „Wstęp” - wprowadzenie w tematykę rozprawy i zawiera tezy oraz jej szczegółowe cele, a także prezentuje układ pracy,
- rozdział 1 – definicja podstawowych zagadnień związanych z polem akustycznym i falą akustyczną,
- rozdział 2 – informacje o metodach pomiaru natężenia dźwięku – m.in. charakterystyka sond PP i PU oraz zastosowanie metody widmowej,
- rozdział 3 – prezentacja błędów systematycznych, występujących przy pomiarach sondami PP,
- rozdział 4 – prezentacja metod synchronicznych: pośredniej i bezpośredniej,

- rozdział 5 – prezentacja elementów stanowiska laboratoryjnego,
- rozdział 6 – wyniki przeprowadzonych pomiarów za pomocą metody z synchronizacją pośrednią oraz prezentacja metody minimalizacji błędu wynikającego ze skończonej rozdzielczości czasowej synchronizacji,
- rozdział 7 – wyniki analizy statystycznej pomiaru metodą z synchronizacją bezpośrednią oraz oszacowanie błędu systematycznego,
- rozdział 8 – prezentacja przykładowego zastosowania metody z synchronizacją bezpośrednią w badaniu charakterystyk kierunkowych zestawu głośnikowego oraz właściwości odbijających elementów wyposażenia pomieszczeń,
- rozdział 9 – prezentacja możliwości wykorzystania metody z synchronizacją bezpośrednią do badania i wizualizacji wektorowych pól natężenia dźwięku,
- rozdział 10 – wnioski końcowe ze wskazaniem możliwości rozwojowych metod oraz ich ograniczeń.

Uwagi na temat poprawności językowej i redakcyjnej rozprawy.

- Praca jest napisana starannie bez większych błędów językowych.
- Generalnie struktura pracy jest logiczna i czytelna.
- Moim zdaniem wstęp powinien być numerowany i otwierać pracę jako rozdział nr. 1.
- Rysunek 4.5 mało czytelny. W wielu rysunkach np. w rozdziale 6.5 czcionki na rysunkach mogłyby być większe i jednakowe w całej dysertacji.
- Cel, zakres oraz teza pracy zostały poprawnie zaprezentowane.

3. OCENA MERYTORYCZNA PRACY

3.1. Istotność zagadnienia.

Tematyka niniejszej dysertacji związana jest z modyfikacją metod pomiarowych, umożliwiających pomiary natężenia dźwięku w celu określenia jego intensywności oraz zobrazowania wektorowego pola akustycznego. Zagadnienia te są istotne przynajmniej z dwóch zasadniczych powodów. Pierwszym z nich jest badanie jakości źródeł dźwięku, np. głośników, zestawów głośnikowych czy sygnalizatorów dźwiękowych. Drugim natomiast detekcja oraz parametryzacja źródeł zakłóceń, bądź hałasu. Bardzo istotna jest optymalizacja sprzętu oraz metod pomiarowych wraz z dokonaniem przeglądu ich zalet i ograniczeń oraz określeniem samej dokładności pomiarowej. Niniejsza praca wpisuje się w tę tematykę, proponując zbadanie dwóch metod: z synchronizacją pośrednią oraz bezpośrednią, mających zastąpić dwumikrofonowe sondy ciśnieniowe PP sondą, zawierającą jeden mikrofon. Modyfikacja ta wymusza zastosowanie dedykowanych algorytmów pomiarowych, które określają zakres zastosowania poszczególnych metod. Doktorant zaprezentował pogłębioną analizę źródeł błędów obydwu rodzaju metod, możliwości ich redukcji oraz zaproponował zakresy zastosowań metod. Ostatecznie dysertacja stanowi znaczący krok w kierunku rozwoju nisko-kosztowych wbudowanych systemów pomiarowych natężenia dźwięku oraz obrazowania wektorowego pola akustycznego.

Uważam, że praca porusza zagadnienia istotne oraz ewidentnie posiada charakter badawczy i wpisuje się w zakres zagadnień dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

3.2. Zawartość merytoryczna pracy

Wstęp prezentuje krótki rys historyczny rozwoju metod pomiarowych natężenia dźwięku. Przedstawiony jest również zarys problemów, wynikających z wykorzystania metod natężeniowych w pomiarach i w konsekwencji propozycja implementacji metody jednomikrofonowej, będącej tematyką rozwijaną w zespole, z którym współpracuje Doktorant. Ostatecznie formułuje On zakres swoich rozważań badawczych jako: „dokładniejsza analiza zaproponowanej metody pomiarowej” w dwóch odmianach: z synchronizacją pośrednią oraz bezpośrednią. Ten ogólny cel został uszczegółowiony w czterech podzadaniach:

- „określenie zakresu stosowalności metody z synchronizacją pośrednią dla różnego rodzaju źródeł dźwięku”,
- „zbadanie skuteczności różnego typu mechanizmów synchronizacji dla metody z synchronizacją pośrednią”,
- „analiza metrologiczna źródeł błędów w metodzie z synchronizacją pośrednią”,
- „zaproponowanie skutecznej metody pozwalającej na minimalizację błędów związanego ze skończoną rozdzielczością czasową procesu synchronizacji”,
- „stworzenie autorskiego systemu pomiarowego i podjęcie próby wykorzystania metody z synchronizacją bezpośrednią do wyznaczenia rozkładu wektorowego pola natężenia dźwięku i jego wizualizacja”.

We wstępie również zdefiniowano dwie tezy pracy:

- dla metody z synchronizacją bezpośrednią:
 - „**dzięki zsynchronizowaniu już na etapie pomiaru procesu akwizycji i generacji możliwe jest, na podstawie dokonanych w dyskretnych punktach pomiarów ciśnienia akustycznego, wyznaczanie rozkładu wektorowego pola akustycznego**”,
- dla metody z synchronizacją pośrednią:
 - „**proces synchronizacji sygnałów ciśnieniowych zarejestrowanych w kolejnych pozycjach mikrofonu jest możliwy do realizacji zarówno za pomocą czujników ciśnieniowych (mikrofon) jak i przyspieszonych (akcelerometr)**”.

W niniejszym rozdziale, stanowiącym wprowadzenie do tematyki oraz określającym tezy i zakres pracy, moim zdaniem zabrakło pogłębionego studium na temat istotności przedmiotowego zagadnienia badawczego. Doktorant, powołując się na bibliografię [60] (wg. numeracji w dysertacji) oraz określając, iż ma zostać przeprowadzona „dokładniejsza analiza”, wskazuje, że niniejsza dysertacja stanowi kontynuację prac, prowadzonych przez promotora Doktoranta. Co samo w sobie jest argumentem za podjęciem tej tematyki, natomiast wartościowym byłoby określenie, iż zastosowanie owej „dokładniejszej analizy” przyczyni się do polepszenia np. dokładności pomiarów, tudzież rozwiązania problemów związanych z pomiarami natężenia dźwięku np. w przemyśle. Dopiero w rozdziale 2 oraz w kolejnym rozdziale: 4.2 Doktorant pokrótce przytoczył przykłady obszarów zastosowań pomiaru natężenia dźwięku wraz z wyszczególnieniem bibliografii. Jednak, po lekturze wstępu do dysertacji, wciąż pozostaje pytanie, w jakich aplikacjach znajdą zastosowanie wyniki tej pracy, tj. czy jest to problematyka lokalizacji źródeł dźwięku, oceny jakości zestawów głośnikowych czy pomiarach hałasu czy też może inna?

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do podstaw fizycznych tematyki pola akustycznego oraz parametrów z nim związanych. Jak sam Doktorant wskazuje, jest to rozdział zawarty w celach usystematyzowania pojęć.

W **rozdziale 2** Doktorant przedstawia podstawy fizyczne układów pomiarowych natężenia dźwięku. Sygnalizuje zastosowania pomiaru natężenia dźwięku, wskazując stosowne źródła bibliograficzne, bez szerszego komentarza. Następnie omawia metody pomiarowe: laserowa anemometria obrazowa PIV, sondy natężeniowe typu PU (z przetwornikiem ultradźwiękowym, z przetwornikiem typu Microflown), zastosowanie analizy częstotliwościowej oraz zjawisko powstawania błędów systematycznych w czujnikach PU, sondy natężeniowe typu PP oraz zastosowanie analizy widmowej w sondach PP.

Rozdział 3 prezentuje możliwe błędy powstające w wyniku pomiarów natężenia dźwięku za pomocą sond PP. Jako źródła błędów zidentyfikowano: błędy aproksymacji pochodnej ilorazem różnicowym, rozproszenie i dyfrakcję fal dźwiękowych na sondzie pomiarowej oraz błąd fazowy. Przytoczone źródła błędów oraz ich analityczne szacowanie przeprowadzono na podstawie przeglądu literaturowego. W niniejszym rozdziale, na podstawie studium literaturowego, zostały również przytoczone metody kompensacji odpowiedzi częstotliwościowych w sondzie PP: metodę transmitancji widmowej, metodę kompensacji z wykorzystaniem wzorcowej sondy PP, kalibrację z wykorzystaniem pola bliskiego przez głośnik dynamiczny oraz metody kalibracji stosowane w urządzeniach do pomiaru wektora natężenia dźwięku.

W **rozdziale 4** Doktorant przedstawił synchroniczne metody pomiaru natężenia dźwięku w odmianach z synchronizacją bezpośrednią i pośrednią. Określono również główne ograniczenia metod. Pierwsza z metod – bezpośrednia, może być stosowana wyłącznie do badania natężenia dźwięku, pochodzącego ze współpracującego z systemem pomiarowym generatora dźwięku, wytwarzającego testowy sygnał okresowy. Druga z metod umożliwia pomiar natężenia dźwięku innych źródeł, natomiast również źródła te powinny generować sygnał okresowy. Ponadto metoda ta wymaga zastosowania dodatkowego mikrofonu referencyjnego. W dalszej części rozdziału Doktorant przytacza oraz krótko charakteryzuje możliwe źródła błędów w metodach synchronicznych: błąd związany ze zmiennością warunków podczas wykonywania pomiarów w kolejnych pozycjach mikrofonu, błąd związany z dokładnością pozycjonowania mikrofonu, błąd związany z charakterem mierzonego sygnału oraz błąd związany z ograniczoną rozdzielczością synchronizacji. Na rys. 4.6 przedstawia zależność błędu przesunięcia fazowego, wprowadzonego przez niedokładność pozycjonowania mikrofonu w funkcji częstotliwości. Doktorant natomiast nie podaje jaka jest zależność i skąd ona pochodzi.

Rozdział 5 prezentuje elementy układu pomiarowego, który posłuży do wyznaczenia parametrów, mierzonych w kolejnych rozdziałach. Zaprezentowano: komorę bezchową, system do akwizycji i generacji sygnałów, obrotową sondę pomiarową oraz manipulator kartezyjski 3D do pozycjonowania mikrofonu. Ostatni element jest autorską konstrukcją, opartą o mikrokontroler AVR ATMEGA 328, współpracujący z 3 silnikami krokowymi oraz z oprogramowaniem napisanym w języku LabView. Obszar roboczy manipulatora wynosił 1,5 m x 1,0 m x 1,0 m.

W **rozdziale 6** przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, przeprowadzonych za pomocą metody pośredniej. Na rys. 6.1.1 zaprezentowano umiejscowienie źródła dźwięku oraz czujników podczas pomiarów metodą pośrednią. Na rys. 6.1.2 przedstawiono algorytmy wyznaczania natężenia dźwięku, wraz z konfiguracją lokalizacji poszczególnych czujników. Warto na tym rysunku zaznaczyć również kierunek, z którego pada testowy dźwięk. Wyjaśniono również metodę porównania sygnałów referencyjnych w celu uzyskania informacji o przesunięciu fazowym pomiędzy sygnałami zarejestrowanymi przez czujnik dźwięku w dwóch położeniach głowicy. Doktorant określa, iż do filtracji sygnałów wykorzystano cyfrowy pasmowo-przepustowy filtr IIR o nieskończonej odpowiedzi impulsowej i pasmach tercjowych. Warto by już na tym etapie przytoczyć wartości częstotliwości środkowej oraz odcięcia filtra.



W podrozdziale 6.2 zamieszczono wyniki pomiarów statystycznych natężenia dźwięku w przypadku, gdy źródłem dźwięku były:

- aktywny zestaw głośnikowy sterowany przebiegami sinusoidalnym (500 Hz i 1 kHz) oraz prostokątnym (100 Hz),
- samochodowy sygnał dźwiękowy,
- małe urządzenia AGD – blender,
- elektronarzędzia – wyrzynarka,
- silnik indukcyjny.

Zaprezentowano przebiegi umożliwiające przeanalizowanie rezultatów metody na poszczególnych etapach obliczeń: przed synchronizacją, podczas obliczania funkcji korelacji wzajemnej oraz po zsynchronizowaniu przebiegów pomiarowych. W przypadku źródeł dźwięków, sterowanymi sygnałami niesinusoidalnymi, zastosowano filtry tercjowe o częstotliwościach środkowych: 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz oraz 5000 Hz. Zostały porównane wyniki pomiarów z zastosowaniem metod: bez synchronizacji, z synchronizacją pośrednią sygnałów pochodzących z mikrofonu, z synchronizacją pośrednią sygnałów pochodzących z akcelerometru oraz klasycznej PP. Wyniki zostały zaprezentowane na 49. rysunkach zawartych w podrozdziałach 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4, 6.2.5, 6.2.6, 6.2.7. W dalszych dwóch podrozdziałach przedstawiono zestawienie tabelaryczne wartości oczekiwanych oraz odchyień standardowych, obliczanych z serii 100 pomiarów dla każdego z przypadków – tabele 6.1 oraz 6.2, a także komentarz podsumowujący tę część badań. Brakuje jednak bardziej szczegółowego komentarza do poszczególnych rysunków, bądź też grup rysunków. Żaden z nich nie został wymieniony w tekście podrozdziału, widnieją one tylko w końcowym spisie rysunków. Na rysunkach, na których umieszczono wartości obliczonych natężeń dźwięku trudno jest oszacować jakie są różnice pomiędzy pomiarem metodą klasyczną PP a metodami z synchronizacjami. Myślę, że bardziej celowym byłoby zamieszczenie tylko na jednym z rysunków wyników pomiaru uzyskanych metodami klasyczną, bez synchronizacji oraz z synchronizacjami, natomiast na pozostałych rysunkach należałoby pominąć metodę bez synchronizacji. Wykazałoby to istotnie większy rozrzut wyników dla metody bez synchronizacji, co potwierdza nieprzydatność tej metody, natomiast lepiej widoczne by były różnice pomiędzy metodami z synchronizacją.

W wymienionych badaniach uzyskane wyniki były porównywane w stosunku do metody klasycznej. Metoda ta więc była metodą referencyjną. Być może interesujące byłoby wyrażenie różnic pomiędzy badanymi metodami a metodą referencyjną np. w procentach. Na wykresach często wartości oczekiwane, uzyskane za pomocą metody referencyjnej były powyżej badanych metod. Być może warto by uwzględnić ten fakt w postaci błędu systematycznego i wprowadzić poprawkę.

Ostatecznie przeprowadzona analiza uzyskanych wyników umożliwiła na konkluzję, której najważniejszymi elementami były:

- rozrzut wyników jest zdecydowanie mniejszy oraz wartość oczekiwana bliższa jest metodzie klasycznej w przypadku sygnałów o wyraźnie widocznych składowych widma częstotliwościowego – słaba dokładność dla źródeł typu wyrzynarka lub silnik indukcyjny,
- dobór częstotliwości środkowej filtra powinien być uzależniony od widma i częstotliwości dominującej badanego źródła dźwięku,
- metody synchroniczne cechują się większym odchyleniem standardowym w stosunku do metody klasycznej,
- istnieją różnice wartości oczekiwanej (średniej) pomiędzy metodami synchronicznymi oraz klasyczną,



- lepsze efekty daje mikrofon, jako źródło sygnału referencyjnego, w stosunku do akcelerometru, aczkolwiek możliwy jest pomiar natężenia dźwięku za pomocą obydwu typów czujników.

Powyższe wnioski niosą element oryginalności badań, a w szczególności ostatni z wniosków **udowadnia drugą tezę:**

- „proces synchronizacji sygnałów ciśnieniowych zarejestrowanych w kolejnych pozycjach mikrofony jest możliwy do realizacji zarówno za pomocą czujników ciśnieniowych (mikrofon) jak i przyspieszonych (akcelerometr)”.

W podrozdziale 6.4 Doktorant rozważa wpływ stosunku sygnał-szum (SNR) na wyniki pomiaru metodą z synchronizacją pośrednią. Wykonując eksperyment, w którym dodawał do przebiegu sinusoidalnego szum biały o parametrach, umożliwiających modyfikację parametru SNR całego sygnału, obliczył wartości natężenia dźwięku przy zastosowaniu filtrów o dwóch pasmach tercjowych: 1 kHz oraz 2 kHz. Następnie określił przy jakich wartościach SNR jest zauważalny największy wpływ na rozrzut oraz wartość oczekiwaną obliczeń. Rysunek 6.4.4 wskazuje, dla pasma 1 kHz, na utrzymującą się na stałym poziomie wartości oczekiwaną praktycznie dla wszystkich parametrów SNR zarówno dla metody klasycznej PP jak i metody z synchronizacją. Sugeruje to, iż możliwe by było wprowadzenie poprawki, jako metody eliminacji błędu wyznaczania wartości oczekiwanej natężenia dźwięku. W przypadku pasma 2 kHz zależność wartości oczekiwanej w funkcji zmian SNR jest dużo bardziej widoczna i Doktorant wykazuje, iż w dla tego pasma metoda synchroniczna „nie działa właściwie”.

W równaniu 6.2 Doktorant wprowadza definicję *błędu względnego metody z synchronizacją pośrednią* i oznacza go jako e_{noise} . Wielkość ta informuje o procentowym stosunku wartości skutecznej szumu do całego sygnału. Wielkość ta nie jest zatem definicją błędu pomiaru natężenia dźwięku. Oczywiście, z przeprowadzonych badań Doktoranta, wynika, iż sam błąd pomiaru natężenia będzie proporcjonalny do wzrastającego udziału składowej szumowej w całym sygnale, nie mniej jednak trudno jest na tym etapie stwierdzić, iż jest to błąd całej metody. Być może wielkość e_{noise} powinna mieć inną nazwę – np. procentowy współczynnik udziału szumu w sygnale. Poza tym, w przytoczonej zależności licznik powinien być wartością bezwzględną, ponieważ w przeciwnym przypadku wartości procentowe będą ujemne.

Kolejnym aspektem jest fakt, iż we wzorze 6.2 wzięte są pod uwagę wartości skuteczne zarejestrowanych sygnałów ciśnieniowych, pochodzących z mikrofonów: Syg_{RMS} oraz $Szum_{RMS}$. Natomiast we wzorze 6.3, mówiącym o powyższym błędzie w skali decybelowej, do obliczeń wzięte są wartości natężeń dźwięku. Ta definicja moim zdaniem bardziej odpowiada nazwie *błędu metody pomiaru natężenia dźwięku z synchronizacją pośrednią*, aniżeli poprzednia zależność, ponieważ dotyczy ostatecznie obliczanej wielkości. Ponadto w równaniu 6.3, Doktorant do obliczeń, wiążących współczynnik SNR z natężeniami dźwięku, zastosował wzór na stosunek mocy: $10 \log(P_{syg}/P_{szumu})$, gdzie P_{syg} oznacza moc sygnału a P_{szumu} moc szumu. Dlaczego taka interpretacja, skoro moc akustyczna jest całą natężenia dźwięku po powierzchni? Czy nie należałoby zastosować wzoru na stosunek wartości skutecznych natężeń sygnału i szumu? Zastanawiającym jest również stwierdzenie, iż brak jest możliwości pomiaru składowej szumowej sygnału, natomiast do obliczenia równań 6.2 i 6.3 konieczna jest znajomość odpowiednio: wartości skutecznej ciśnienia składowej szumowej oraz natężenia dźwięku składowej szumowej. Oczywiście na etapie badań laboratoryjnych jest możliwe wyznaczenie tych parametrów ze względu na znajomość sygnałów generowanych w układzie, natomiast samo stwierdzenie jest niejasne.

Na rys. 6.4.10 oraz 6.4.11 na osi Y podane są parametry, zaczynające się od prefiksu *err*, które nie są wyszczególnione we wzorach 6.2 i 6.3, poza tym podpisy pod rysunkami są identyczne.



Ostatecznie Doktorant określił minimalną wartość współczynnika SNR dla wartości natężenia dźwięku, tak aby uzyskać zmiany błędu na poziomie 1dB. Różnicę pomiędzy zamodelowanym błędem, a wynikającym z pomiarów Doktorant szacuje na poziomie około 0,5 dB i tłumaczy różnicami w charakterystykach częstotliwościowych mikrofonów. Być może rozwiązaniem byłaby kalibracja metody w celu niwelacji tego błędu.

W podrozdziale 6.5 została podjęta próba minimalizacji błędu synchronizacji z wykorzystaniem dwuetapowej korelacji. Metoda związana była z zastosowaniem: nadpróbkowania, wyznaczenia precyzyjnego przesunięcia fazowego oraz decymacji. Jako sygnały testowe zastosowano sygnał sinusoidalny oraz samochodowy sygnał dźwiękowy. W przypadku pierwszego z sygnałów osiągnięte wyniki są obiecujące, ponieważ umożliwiły one znaczną redukcję odchylenia standardowego pomiarów natężenia dźwięku (nawet kilkukrotną) oraz zmniejszenia różnicy wyznaczania wartości oczekiwanej metody z synchronizacją oraz klasycznej (około kilkanaście procent). Doktorant w tym kontekście mógł wskazać procentową redukcję wymienionych wielkości, co by było bardziej czytelne. W przypadku drugiego z sygnałów potwierdzono prawidłowość dla odchylenia standardowego, natomiast wartość oczekiwana różniła się znacznie w stosunku do metody klasycznej, zarówno dla filtra tercjowego 1 kHz oraz 2 kHz.

Na rys. 6.5.2 przedstawiono fragmenty sygnałów pomiarowych po synchronizacji z wykorzystaniem korelacji zgrubnej oraz precyzyjnej. Części a) oraz b) rysunków są na tyle podobne, iż trudno jest tu zauważyć różnicę. Być może warto by zakreślić, które z części rysunków są istotne dla toku rozumowania, opisanego w tekście.

W podrozdziale 6.6 Doktorant przedstawia kolejne źródło błędu, mogące wystąpić w pomiarze pośrednim – błędu fazowego, pojawiającego się w sytuacjach nieprecyzyjnego położenia głowicy pomiarowej w stosunku do źródła dźwięku. W tym celu została podjęta próba estymacji kąta natarcia fali na sondę pomiarową. Głównymi równaniami, opisującymi w sposób analityczny ten rodzaj błędu są równania 6.6 oraz 6.7. Rys. 6.6 obrazuje wartość błędu estymacji w funkcji kąta α dla różnych wartości kąta φ . Brak jest jednak pogłębionego komentarza do tego rysunku.

Doktorant zaprezentował procedurę badania błędu za pomocą pomiaru natężenia dźwięku w funkcji obrotu głowicy względem kierunku padania dźwięku. Głowica mogła znajdować się w 200 różnych położeniach obrotowych. Badania przeprowadzono dla dwóch częstotliwości próbkowania sygnałów z mikrofonów: 100 kHz oraz 50 kHz. Przeprowadzono je tym razem stosując jako czujnik dźwięku wyłącznie mikrofon oraz wygenerowano dźwięk sinusoidalny o częstotliwości 500 Hz. W drugiej części eksperymentu zastosowano przebieg prostokątny o częstotliwości 100 Hz oraz filtry tercjowe o pasmach 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz oraz 5 kHz. W celu minimalizacji błędu metody zastosowano dla metody z synchronizacją pośrednią algorytm z dwuetapową korelacją oraz uśrednianie wartości składowych natężenia dźwięku I_x oraz I_y . Brak jest jednak szczegółowego opisu jak to uśrednianie było przeprowadzone. Czy dla każdej pozycji położenia głowicy wykonano po 100 pomiarów i obliczeń I_x oraz I_y , po czym powtórzono tą procedurę N razy a następnie uśredniono? Trudno jest jednoznacznie to określić na podstawie lektury tekstu. Następnie w rozdziale 6.6.5 dokonał podsumowania obszernych badań, natomiast nie odniósł się do wielu zagadnień, które rozważał, lub stwierdzenia są bardzo lakoniczne. Jaki jest wpływ uśredniania, w szczególności jaka jest optymalna wartość N? Jaki jest wpływ częstotliwości próbkowania? Które pasmo tercjowe jest optymalne? Czy błąd metody zależy od kształtu sygnału sterującego źródło dźwięku? Jaki dopuszczalny zakres częstotliwości sygnału sterującego daje dobre efekty w przypadku zastosowania metody z synchronizacją pośrednią? Ostatecznie lektura całości rozdziału 6.6, pomimo ewidentnych braków w komentarzu do przeprowadzonych badań (rozdział 6.6.5), pozwalają określić, iż istotnie zastosowanie metody



z dwuetapową korelacją oraz uśrednianiem daje pozytywne efekty w kontekście redukcji błędu związanego z estymacją kąta natarcia fali.

Podsumowując rozdział 6, w którym badaniu metodę z synchronizacją pośrednią, odnosi się do drugiej z tez dysertacji. Teza ta, w zasadzie została już wcześniej udowodniona po rozdziale 6.4, niemniej jednak Doktorant przedstawił istotne badania, analizując możliwości redukcji błędów. Rozważania te dotyczyły jednak tylko już czujnika mikrofonowego. Taki stan rzeczy Doktorant wytłumaczył zbyt dużym rozrzutem wyników – ich znaczącym odchyleniem standardowym, ale nie określił, czy wobec tego w ogóle jest sens przeprowadzenia rozważań dla akcelerometru, wyrażonych w rozdziałach 6.5 i 6.6. Być może należałoby dobrać parametry proponowanych metod, bądź też zastosować inne metody redukcji?

Do najistotniejszych osiągnięć naukowych, zawartych w tej części rozdziału zaliczam:

- propozycję oraz badania nad zastosowaniem dwuetapowej korelacji w celu minimalizacji błędu synchronizacji,
- propozycję oraz badania nad minimalizacją błędu estymacji kąta fali za pomocą uśredniania.

Rozdział 7 dotyczy prezentacji badań, związanych z metodą synchroniczną bezpośrednią. Zgodnie z opisaną w podrozdziale 4.2 procedurą pomiarową, wykonano pomiary natężenia dźwięku, generowanego przez zestaw głośnikowy, sterowany za pomocą karty przetwornikowej. Generowany był sygnał sinusoidalny o częstotliwości 1 kHz z częstotliwością próbkowania 100 kHz. Sygnał ten był zsynchronizowany z przetwornikiem rejestrującym dźwięk z mikrofonu pomiarowego. Testowany był wyłącznie czujnik mikrofonowy. Badań nad zastosowaniem czujnika akcelerometrycznego nie podjęto. Doktorant nie podaje informacji jaki był powód pominięcia akcelerometru w badaniach. Wyniki badań zestawiono z rezultatami osiągniętymi za pomocą metody klasycznej. Również widoczny jest błąd systematyczny w obliczeniach wartości oczekiwanej, natomiast odchylenie standardowe jest mniejsze, jak to miało miejsce w metodzie pośredniej i, co podkreśla Doktorant, efekt ten uzyskuje się bez dodatkowego uśredniania i obliczania korelacji wzajemnej. Jest to niewątpliwie zaleta metody bezpośredniej, w stosunku do pośredniej, co również zauważa Doktorant. Następnie przeanalizowano błąd związany z estymacją kierunku natarcia fali. Zastosowano procedurę pomiarową jak w przypadku metody pośredniej, przy czym, zgodnie z założeniami metody, nie występował dodatkowy kanał synchronizacji i w każdym z 200 położań głowicy wykonano tylko 1 pomiar. Tutaj pytanie, dlaczego nie wykonano badań statystycznych dla każdego z położań? Czy było to związane wyłącznie z nakładem pracy oraz obliczeń, czy był jakiś inny powód merytoryczny? Również zmieniono źródło sygnału sterującego zestaw głośnikowy na przestrajany logarytmicznie sygnał sinusoidalny o czasie trwania 10 s i zmieniającej się częstotliwości w zakresie 20 Hz – 20 kHz. Uzyskane wyniki są interesujące, ze względu na fakt, iż dla filtra trzecjowego o częstotliwości środkowej 250 Hz otrzymano mniejszy błąd pomiaru kąta natarcia fali w metodzie bezpośredniej, niż dla metody klasycznej. Warto tutaj byłoby jednak skomentować wyniki dla pozostałych filtrów trzecjowych. Również interesujące jest dlaczego akurat dla filtra o tej częstotliwości środkowej uzyskuje się tak dobre efekty, a dla pozostałych wyniki są bądź gorsze, bądź to na podobnym poziomie? Rezultaty badań, przedstawione w podrozdziale 7.3, były publikowane we współautorskiej publikacji [1]. Jaka jest część merytoryczna Doktoranta w tych badaniach?

Do najistotniejszych osiągnięć naukowych, zawartych w tym rozdziale zaliczam:

- wyznaczenie błędów metody z synchronizacją bezpośrednią do obliczenia natężenia dźwięku i oszacowania błędu metody,



- wskazanie parametrów filtra tercjowego, dla których wyniki są lepsze w stosunku do metody klasycznej.

W **rozdziale 8** zaprezentowano przykłady zastosowań metody z synchronizacją bezpośrednią. Zastosowania te zostały opublikowane w trzech współautorskich artykułach i dotyczą badania wektorowych charakterystyk kierunkowych zestawu głośnikowego [4]. W pracy [1] przedstawiono zastosowanie metody do badania właściwości odbijających materiałów. W tym samym zastosowaniu Doktorant przytacza jeszcze cytowanie artykułu [3]. Natomiast brak jest odniesienia do cytowania [2] oraz scharakteryzowania czego dotyczył. Zatem istotne byłoby określenie, jaki jest zakres merytoryczny badań, wykonanych przez Doktoranta, opublikowanych w pozycjach [1] – [4].

Do najistotniejszych osiągnięć naukowych, zawartych w tym rozdziale zaliczam:

- wskazanie zastosowań metod z synchronizacją bezpośrednią,
- zbudowanie stanowisk laboratoryjnych oraz oprogramowanie.

Rozdział 9 stanowi propozycję zastosowania metody z synchronizacją bezpośrednią w obrazowaniu akustycznych pól wektorowych. Doktorant przedstawił obecny stan wiedzy, dotyczącej systemów pomiarowych do wizualizacji wektorowych pól akustycznych, a następnie zaproponował zastosowanie metody z synchronizacją bezpośrednią do badania tego parametru. Obiektem badanym był zestaw głośnikowy, dla którego badano akustyczne pole wektorowe w 3 płaszczyznach z rozdzielczością 1 cm w każdym z wymiarów, co dla płaszczyzny xy oznacza liczbę 3111 punktów pomiarowych. Autorski robot kartezjański sterowany był z komputera za pomocą oprogramowania LabView a następnie przeprowadzana była akwizycja sygnału, synchronizacja, obliczenia natężenia dźwięku i ostatecznie wyznaczone były wektory pola akustycznego, zgodnie z procedurą przedstawioną na rys. 9.3. Jako potwierdzenie poprawnego działania metody Doktorant zaprezentował rys. 9.4, gdzie zwizualizowano pole akustyczne wokół zestawu głośnikowego w płaszczyźnie xy oraz 9.5 zy . Obrazowanie było wykonane dla 12-stu częstotliwości sygnału sterującego o wartościach z zakresu 250 Hz - 5 kHz. Przedstawione rozważania **potwierdzają drugą z postawionych tez**, mówiącej o możliwości zastosowania metody z synchronizacją bezpośrednią do wyznaczenia akustycznych pól wektorowych. Teza ta jest postawiona relatywnie bezpiecznie, ze względu na jakościowe oszacowanie możliwości zastosowania metody. Interesującym byłoby jednak porównanie uzyskanych wyników za pomocą metody z synchronizacją z wynikami metody klasycznej. Oczywiście wiązałoby się z powtórным wykonaniem bardzo dużej liczby pomiarów. W podsumowaniu rozdziału 9, Doktorant prezentuje ograniczenia metody oraz jej silne strony, jak i również możliwości rozszerzenia sprzętu pomiarowego o implementację w nisko-kosztowym systemie wbudowanym.

Do najistotniejszych osiągnięć naukowych, zawartych w tym rozdziale zaliczam:

- wykazanie przydatności metody z synchronizacją bezpośrednią do wyznaczenia akustycznego pola wektorowego.

W **rozdziale 10** zostało zawarte 3 stronicowe podsumowanie, omawiające możliwość zastosowania metody pomiaru natężenia dźwięku z synchronizacją bezpośrednią jako alternatywę do metody klasycznej. Również Doktorant podsumował sposób wykorzystania metody z pośrednią synchronizacją oraz przytoczył źródła błędów, mogących wpływać na dokładność pomiaru. Ostatecznie zestawione zostały oryginalne osiągnięcia Doktoranta.



3.3. Uwagi dyskusyjne

1. We wstępie nieznacznie tylko zarysowano wagę podjętego zagadnienia. Warto określić, jaki pozytywny wpływ ma praca na konkretne zastosowania naukowe lub przemysłowe. O ile, lub w jaki sposób praca pozytywnie wpłynęła na owe zastosowania?
2. W rozdziale 3.1 warto zamieścić dodatkowy komentarz do rys. 3.1.
3. W rozdziale 4.2 warto zamieścić dodatkowy komentarz do rys. 4.2.
4. W rozdziale 4.4.1, na rys. 4.6 przedstawiona jest zależność błędu przesunięcia fazowego, wprowadzonego przez niedokładność pozycjonowania mikrofonu, w funkcji częstotliwości. Jaka jest ta zależność i skąd ona pochodzi?
5. W rozdziale 6.3 brakuje komentarza do poszczególnych rysunków z podrozdziałów 6.2.1 – 6.2.7 - widnieją one tylko w końcowym spisie rysunków. Być może warto by pogrupować tematycznie rysunki i podsumować je wykazując różnice pomiędzy nimi.
6. Na rys. 6.5.2 przedstawiono fragmenty sygnałów pomiarowych po synchronizacji z wykorzystaniem korelacji zgrubnej oraz precyzyjnej. Części a) oraz b) rysunków są na tyle do siebie podobne, iż trudno jest tu zauważyć różnicę. Być może warto by zakreślić, które z części rysunków są istotne dla toku rozumowania, opisanego w tekście.
7. Równanie 6.6. Czy argument funkcji \sin powinien składać się z dwóch składników: α oraz φ_b . W obecnej wersji wzoru argument funkcji \sin zawiera tylko pierwszy z tych elementów. Podobnie sytuacja wygląda w mianowniku z funkcją \cos .
8. Rys. 6.6 obrazuje wartość błędu estymacji w funkcji kąta α dla różnych wartości kąta φ . Brak jest jednak pogłębionego komentarza do tego rysunku.
9. Na rysunkach 6.6.5 oraz 6.6.6 zbyt mała czcionka, zwłaszcza w opisach osi. Dlaczego oś Y nie zaznaczono opisano α_{err} , zgodnie z równaniem 6.7 tylko $\alpha_{err} - \alpha$?
10. W rozdziale 6.6.5 w pierwszym zdaniu w nawiasie jest niezrozumiałe stwierdzenie: „z małą w stosunku do analiz z podrozdziału 4.4.3”. Wydaje się że jest to zdanie nie dokończone.
11. W celu minimalizacji błędu metody zastosowano dla metody z synchronizacją pośrednią algorytm z dwuetapową korelacją oraz uśrednianie wartości składowych natężenia dźwięku I_x oraz I_y . Brak jest jednak szczegółowego opisu jak to uśrednianie było przeprowadzone. Czy dla każdej pozycji położenia głowicy wykonano po 100 pomiarów i obliczeń I_x oraz I_y , po czym powtórzono tą procedurę N razy a następnie uśredniono? Trudno jest jednoznacznie to określić na podstawie lektury tekstu.
12. W rozdziale 6.6.5 znajduje się podsumowanie obszernych badań, natomiast nie odniesiono się do wielu zagadnień, lub stwierdzenia są bardzo lakoniczne. Proszę o wyjaśnienie poniższych.
 - a. Jaki jest wpływ uśredniania, w szczególności jaka jest optymalna wartość N ?
 - b. Jaki jest wpływ częstotliwości próbkowania?
 - c. Które pasmo tercjowe jest optymalne?
 - d. Czy błąd metody zależy od kształtu sygnału sterującego źródło dźwięku?
 - e. Jaki dopuszczalny zakres częstotliwości sygnału sterującego daje dobre efekty w przypadku zastosowania metody z synchronizacją pośrednią?
13. Czy badania z rozdziałów 6.5 i 6.6 można zastosować dla czujników akcelerometrycznych?
14. Dlaczego w metodzie bezpośredniej nie badano możliwości zastosowań czujnika akcelerometrycznego, tak jak to miało miejsce w metodzie pośredniej?
15. Rozdział 7.3. Podczas pomiaru kąta natarcia fali akustycznej, w każdym z 200 położzeń głowicy wykonano tylko 1 pomiar. Dlaczego nie wykonano badań statystycznych dla każdego



z położeń? Czy było to związane wyłącznie z nakładem pracy oraz obliczeń, czy był jakiś inny powód merytoryczny?

16. Rozdział 7.3. Dla filtru tercjowego o częstotliwości środkowej 250 Hz otrzymano mniejszy błąd pomiaru kąta natarcia fali w metodzie bezpośredniej, niż dla metody klasycznej. Proszę skomentować wyniki dla pozostałych filtrów tercjowych. Dlaczego akurat dla filtru o tej częstotliwości środkowej uzyskuje się tak dobre efekty, a dla pozostałych wyniki są bądź gorsze, bądź to na podobnym poziomie?
17. Jaki jest zakres merytoryczny b/adań, wykonanych przez Doktoranta, opublikowanych w pozycjach [1] – [4]?

3.4. Ogólna ocena merytoryczna pracy

Praca jest naukowo kompletna. Występują w niej:

- odniesienie do literatury przedmiotu badań – aczkolwiek odczuwa się brak głębszego komentarza,
- modelowanie błędu na podstawie studium literaturowego,
- projekt i konstrukcja stanowiska laboratoryjnego,
- elementy rejestracji rzeczywistych danych pomiarowych z wykorzystaniem stanowiska laboratoryjnego,
- porównanie wyników badanych metod z rezultatami uzyskanymi za pomocą metody referencyjnej.

Poszukiwania naukowe Doktoranta, zawarte zasadniczo w rozdziałach 6, 7, 8 i 9, zaowocowały autorskimi aspektami badawczymi, które stanowią wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika. Moim zdaniem do najważniejszych z nich należą:

- budowa autorskiego systemu pomiarowego oraz implementacja metody z synchronizacją pośrednią w celu pomiaru natężenia dźwięku pochodzącego z różnych typów źródeł,
- budowa stanowiska oraz implementacja metody z synchronizacją bezpośrednią w celu pomiaru natężenia dźwięku w zastosowaniach pomiaru aktywnych zestawów głośnikowych, badania właściwości odbijających materiałów oraz obrazowania wektorowych pól akustycznych,
- zaproponowanie metod redukcji błędów w metodzie z synchronizacją pośrednią.

Zaprezentowane badania mają charakter rozwojowy, zmierzające w kierunku opracowania metody pomiaru natężenie dźwięku oraz obrazowania wektorowych pól akustycznych m.in. z zastosowaniem urządzeń wbudowanych.

Uważam, że Doktorant dysponuje teoretycznym oraz praktycznym warształem badawczym, potrafi zaplanować eksperyment naukowy oraz posiada umiejętnościami publikowania wyników badań, czego dowodzą parametry bibliometryczne: 7 publikacji indeksowanych WoS (w tym z listy JCR), indeks Hirscha 1, 3 cytowania (bez autocytowań).



4. WNIOSEK KOŃCOWY

Po zapoznaniu się z pracą doktorską pt.: „Wyznaczanie natężenia dźwięku na podstawie synchronizowanych przebiegów ciśnienia akustycznego”, oraz na podstawie dokumentu „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20.07.2018 r. (Dz. U. 2021 poz. 478) stwierdzam, iż

przedstawiona rozprawa spełnia

wymagania określone w przedmiotowym dokumencie i w związku z powyższym

wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz o dopuszczenie

mgr inż. Michała Raczyńskiego do publicznej obrony.

Michał Szmejdo

Bibliografia

- [1]. Mickiewicz W., Raczyński M., Parus A.: "Performance Analysis of Cost-Effective Miniature Microphone Sound Intensity 2D Probe", *Sensors* **2020**, *20*, 271. <https://doi.org/10.3390/s20010271>
- [2]. Mickiewicz W., Raczyński M.: "Mechatronic 3D Sound Intensity Probe and its Application to DOA", *23rd International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR)*, 2018, pp. 747-751, doi: 10.1109/MMAR.2018.8486005.
- [3]. Mickiewicz W., Raczyński M.: "Mechatronic sound intensity 2D probe" *22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 2017, pp. 894-897, doi: 10.1109/MMAR.2017.8046947.
- [4]. Mickiewicz W., Raczyński M.: " Modified pressure-pressure sound intensity measurement method and its application to loudspeaker set directivity assessment", *Metrology and Measurement Systems*, *27* (1), 2020, pp. 181-194, doi: 10.24425/mms.2020.131720.