

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**
zaprasza na
PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr. inż. Bartosza ŻŁOBIŃSKIEGO

która odbędzie się w dniu 2 LUTEGO 2022 roku o godzinie 11:00 w formie hybrydowej
w Sali Audytorium Centralnego (AC) w Gmachu Elektroniki ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa,
przy jednoczesnej transmisji zdalnej na platformie MS Teams*

Temat rozprawy doktorskiej:

„ Analiza generacji dźwięku w idiofonach dętych ”

Promotor : prof. dr hab. inż. Jan Żera - Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki – Politechnika Wrocławska

prof. dr hab. inż. Bożena Kostek – Politechnika Gdańska

Link do transmisji w trybie zdalnym:

https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting_NDhkYzdhdZDctZjRmYi00ODMwLWIwYjctNGZhYzl-kYjIzMWYx%40thread.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%223b50229c-cd78-4588-9bcf-97b7629e2f0f%22%2c%22Oid%22%3a%22abec654c-6073-4114-a2a5-b0ac401702eb%22%7d

* Dostęp do transmisji w trybie zdalnym na platformie MS Teams nie jest ograniczony. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie w trybie zdalnym proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji dr hab. inż. Bartłomieja Salskiego (bartlomiej.salski@pw.edu.pl) w dniu obrony do godz. 9:30.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1. Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej : <https://www.bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techniczna-i-Telekomunikacja> _

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej

Prof. dr hab. inż. Tomasz Starecki

Idiofony dęte to instrumenty muzyczne, w których rolę wibratora spełnia stroik w postaci cienkiej sztabki posiadającej własną sztywność, a rolę incytatora – strumień przepływającego powietrza. Rezonator może przybierać różną formę. Do tej grupy należą m. in. akordeon, fisharmonia, harmonijka ustna oraz piszczałki języczkowe w organach.

Badania dotyczyły zależności postaci drgań stroika i cech generowanego dźwięku od szerokości stroika przetłotowego. Przedstawiono obecny stan wiedzy na temat funkcjonowania idiofonów dętych. Przeprowadzono pomiary ciśnienia akustycznego na wylocie układu sondą mikrofonową i drgań stroika wibrometrem laserowym z użyciem zbudowanego modelu instrumentu pozwalającego na uwzględnienie stroików różnej szerokości. Przeprowadzono numeryczną analizę modalną stroików oraz trójwymiarowe transjentowe symulacje numeryczne interakcji płynu i ciała stałego, korzystając z modelu komputerowego układu z różnymi stroikami.

Wykazano, że podczas generacji dźwięku węższe stroiki wykonują ruchy skrętne. Wskazano niestabilności przepływu powietrza odpowiedzialne za wzbudzenie drgań skrętnych stroika. W przypadku stroika o średniej szerokości uzyskano w widmie generowanego dźwięku największy stosunek amplitud wyższych składowych harmonicznym do amplitudy składowej podstawowej.

Prof. dr hab. inż. Bożena Kostek, czł. koresp. PAN
Politechnika Gdańska,
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Lab. Akustyki Fonicznej

Opinia nt. rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartosza Żłobińskiego

pt.: „Analiza generacji dźwięku w idiofonach dętych”, wykonanej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Jana Żery.

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie sformułowane przez autora

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Bartosza Żłobińskiego pt.: „Analiza generacji dźwięku w idiofonach dętych”. Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, składa się z siedmiu zasadniczych rozdziałów: wstępu, zarysu teorii dotyczącego aerospężystości, drgań układów mechanicznych oraz generowania dźwięku idiofonach dętych, metodyki badań, podejścia analitycznego do opisu drgań własnych stroika, komory stroikowej z uwzględnieniem przepływu powietrza, analizy numerycznej, pomiarów stanowiących tzw. *ground truth*, symulacji numerycznych przebiegów czasowych wychylenia stroika, rozkładu przestrzennego ciśnienia i prędkości przepływu oraz wzbudzania drgań stroika. W pracy zawarto również wnioski, bibliografię oraz dwa dodatki (rozwój historyczny acrofonów stroików i idiofonów dętych oraz klasyfikację idiofonów dętych). W pracy znajdują się również streszczenia w j. polskim i angielskim oraz szczegółowy wykaz oznaczeń. Rozprawa obejmuje 205 stron tekstu.

We Wstępie doktorant podaje przedmiot badań, rozwój badań w zakresie idiofonów dętych, motywację stanowiącą genezę rozprawy, cel i zakres pracy oraz tezę. Warto zauważyć, że autor rozprawy przyjął klasyfikację piszczałek organowych stroikowych wg zasady działania instrumentu, czyli generowania dźwięku. Podstawę tej klasyfikacji autor uzasadnia odniesieniem do poszczególnych części funkcjonalnych zawartych w tab. 1.1. Chociaż autor zauważa, że tytuł rozprawy może być kontrowersyjny, to raczej należy się skłaniać ku opinii, że taka klasyfikacja – jak podaje autor – ma pełne uzasadnienie w konstrukcji tego typu piszczałek organowych, co z kolei stanowi podstawę analizowanego modelu instrumentu. W przywołanych wyjaśnieniach znajduje się też geneza badań prowadzonych w ramach rozprawy. Jak pisze autor, o ile mechanizm generowania dźwięku jest dobrze posadowiony w literaturze tematu, to uwzględnienie konstrukcji (i wymiarów) stroika w układzie piszczałki nie jest wystarczająco dobrze przebadane. Warto też zauważyć, że już we Wstępie autor odnosi się do możliwych trudności związanych z symulacją numerycznego modelu trójwymiarowego. Uzyskanie wystarczającej dokładności

odwzorowania działania pierwszych 80 ms generowanego sygnału modelu fald głosowych człowieka – układ podobny w kontekście występujących w nim elementów do omawianego w pracy – wymagało ok. 720 godzin obliczeń na 128 rdzeniach infrastruktury komputerowej. W uzasadnieniu badań pojawia się również odniesienie do różnic w generowanej barwie piszczałek, która wg źródeł literatury może być wynikiem stosowania różnych szerokości menzur lub też faktu, że stroiki drgają nie tylko poprzecznie, ale wykonują również ruchy skrętne, co może się wiązać ze wzmocnieniem alikwotów w generowanym dźwięku.

Podany cel rozprawy został sformułowany we właściwy sposób i odnosi się do zbadania zjawisk zachodzących w idiofonach dętych, które determinują cechy obiektywne i subiektywne generowanego dźwięku w zależności do menzury szerokościowej stroika. W założeniach analiza ogranicza się do stroików przelotowych w sprzężeniu z rezonatorem i bez rezonatora.

Tezy pracy zostały podane poniżej (przywołuję je w zapisie podanym przez autora rozprawy):

1. Zaklasyfikowanie instrumentów muzycznych takich jak akordeon, fisharmonia, harmonijka ustna i piszczałki języczkowe jako idiofonów dętych, zgodnie ze zdaniem polskich autorów, jest słuszne, ponieważ stroik spełnia rolę wibratora i od jego konstrukcji w największym stopniu zależą parametry obiektywne i subiektywne generowanego dźwięku.
2. W zależności od poprzecznych wymiarów stroika (kierunek prostopadły do płaszczyzny), w której wzbudzone są drgania), zmieniają się amplitudy składowych harmonicznym w widmie generowanego dźwięku w ten sposób, im węższy stroik (w zakresie występujących w praktyce proporcji wymiarów) tym większe amplitudy wyższych składowych harmonicznym w stosunku do amplitudy składowej podstawowej.
3. Zróżnicowanie amplitud wyższych składowych harmonicznym w stosunku do składowej podstawowej wynika ze zróżnicowania przebiegu czasowego wartości całkowitego pola powierzchni, przez którą odbywa się przepływ przez stroik, ponieważ w zależności od wymiarów poprzecznych stroika zmienia się amplituda drgań skrętnych pobudzanego powietrza stroika w ten sposób, że węższy stroik tym większa amplituda drgań skrętnych.
4. Drgania skrętne stroików są wzbudzone na skutek oddziaływania sił aerodynamicznym związanych z niestabilnościami przepływu i w zależności od wymiarów poprzecznych stroika te niestabilności zmieniają się w ten sposób, że im węższy stroik tym większe oddziaływanie aerodynamiczne wzbudzające drgania skrętne.

W odniesieniu do tezy rozprawy, odnosi się wrażenie, że pierwsza teza dotyczy opinii zawartych w literaturze, a nie konkretnego problemu badawczego – wg mnie nie jest potrzebna. Może niewątpliwie służyć jako jedna z konkluzji rozprawy doktorskiej, tj. wniosek pośrednio wynikający z przeprowadzonych badań. Natomiast w pozostałych tezach pracy zawarte są stwierdzenia weryfikowalne eksperymentalnie i są one jasno sformułowane.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym, literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle

Bibliografia zawarta w rozprawie jest dość obszerna i odnosi się do aktualnego stanu wiedzy, chociaż brakuje niektórych wątków badawczych czy przeglądu badań dotyczących analizy piszczałek (w tym stroikowych) organów klasycznych z ostatnich kilku lat. Poniżej podaję kilka źródeł, które mogłyby się znaleźć w przeglądzie stanu wiedzy.

REEDDESIGN (Sound Design of Reed Organ Pipes with Innovative Tools – projekt europejski (CORDIS) w ramach 7. programu ramowego Unii Europejskiej.

T. M. Huber, M. Fatemi, R. Kinnick, J. Greenleaf. Noncontact modal analysis of a pipe organ reed using airborne ultrasound stimulated vibrometry. *Journal of the Acoustical Society of America* 119.4 (2006), pp. 2476–2482. doi: 10.1121/1.2171516.

A. Miklós, J. Angster, S. Pitsch, T. D. Rossing. Interaction of reed and resonator by sound generation in a reed organ pipe." *Journal of the Acoustical Society of America* 119.5 (2006), pp. 3121–3129. doi: 10.1121/1.2188372.

P. Rucz, Examination of the reflection properties of sloping terminations to organ pipes, *The Journal of the Acoustical Society of America* 140, 4213 (2016); <https://doi.org/10.1121/1.4969466>

P. Rucz, A finite element approach for the calculation of self and mutual radiation impedances of resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America* 143:4, 2449-2459, 2018 <https://doi.org/10.1121/1.5033897>.

Może się wydawać, że tematyka rozprawy ma charakter niszowy, jednak ze względu na fakt, że była w kręgu zainteresowań obszaru badawczego Unii Europejskiej (przytoczony powyżej tytuł projektu europejskiego fundowanego w ramach 7. programu ramowego), to należy uznać jej wysoką aktualność.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione

W przyjętej metodologii doktorant wykorzystał zarówno podstawy teoretyczne, pomiary (metody aktualne i bardzo zaawansowane), jak i propozycję modelu stroika (rozpatrywanego w wariantach) oraz symulację komputerową. W szczególności wykorzystanie symulacji do określenia przyczyny pomiaru drgań skrętnych stroika uważam za bardzo nośną propozycję w kontekście potencjału badawczego. Jest to niewątpliwie jedno z ważniejszych dokonań doktoratu. Zastosowanie symulacji pozwala na dokładny wgląd w zjawiska aerodynamiczne zachodzące w obecności

stroika, co byłoby trudne do uzyskania poprzez pomiary, w tym przypadku aparatura pomiarowa mogłaby zakłócać pracę mierzonego układu. Przyjęte założenie dotyczące podbudowy modelowania numerycznego pomiarami, które mogą stanowić tzw. *ground truth* są jak najbardziej zasadne.

Należy zauważyć, że opis matematyczny uwzględnia układ sprzężonych ze sobą równań różniczkowych cząstkowych, obejmujących ciało stałe (stroik), jak i płynu (powietrze) i te podstawy teoretyczne zostały przeniesione na model numeryczny (z pewnymi uproszczeniami).

Dobór metod i narzędzi jest poprawny i został we właściwy sposób uzasadniony uwarunkowaniami praktycznymi. Przykładem dostosowania się do uwarunkowań praktycznych jest zmiana wykorzystywanych bibliotek numerycznych z powodu rozwoju projektu (konieczność wprowadzania zmian siatki obliczeniowej). **W tym miejscu nasuwa się pytanie czy nie warto by się pokusić o implementację algorytmu, który w sposób automatyczny dostosowałby siatkę obliczeniową do potrzeb eksperymentu symulacyjnego?**

Kolejna uwaga – do dyskusji w trakcie obrony (czy w Odpowiedziach na recenzję) – a mianowicie – czy w eksperymencie badającym zależność pomiędzy szerokością stroika i zawartością wysokich harmonicznych nie należałoby przebadać większego zestawu danych? W eksperymencie wykonanym przez doktoranta przebadano trzy szerokości stroika, zdaję sobie sprawę, że było to uwarunkowane znaczącym wysiłkiem praktycznym, bowiem każdy pomiar wymagał przygotowania dodatkowego stroika. Natomiast może warto by przeprowadzić analogiczny eksperyment numeryczny i wyniki poddać analizie statystycznej? W przypadku analizy symulacji opartej na zweryfikowanych pomiarach (wspomnianych trzech pomiarach zbudowanych stroików) można by było w sposób pośredni zaobserwować, jak wygląda wspomniana w pracy nieliniowość pojawiania się wyższych harmonicznych w funkcji szerokości stroika. Byłby to klasyczny sposób wykorzystania symulacji w miejsce procesu, którego fizyczna realizacja jest trudna lub niemożliwa. Niewątpliwie dużym ograniczeniem praktycznym jest czas obliczeń, pomimo obliczeń wykorzystujących infrastrukturę PLGrid (węzeł 24-rdzeniowy superkomputera Prometheus), stąd założenia prowadzonych eksperymentów musiałyby uwzględniać takie właśnie uwarunkowania. Dlatego brak eksperymentu symulacyjnego na większą skalę nie traktuję jako zarzut. Wskazuje to raczej, jak skomplikowane są procesy przepływów i działania sił aerodynamicznych opisane skonstruowanym modelem numerycznym.

W tym punkcie chciałabym się też odnieść do poszczególnych tez pracy podanych we Wstępie i ich potwierdzenia w przeprowadzonych badaniach.

Jak już wcześniej wspomniano, teza pierwsza wynika w dużym stopniu z teorii budowy instrumentów, zaś argumentacja podana we Wstępie przez autora rozprawy, mówiąca o tym, że instrumenty muzyczne jak akordeon, fisharmonia, harmonijka

ustna i piszczałki języczkowe należą do grupy idiofonów dętych była przekonująca. Dlatego można zgodzić się z konkluzją podaną we Wnioskach, że konstrukcja stroika, spełniającego rolę wibratora, determinuje zarówno widmo amplitudowe przebiegu ciśnienia akustycznego, jak i barwę generowanego dźwięku. Pośrednim dowodem tej konkluzji jest wynik pomiaru sygnału akustycznego emitowanego w zbudowanym modelu instrumentu w przypadku bez rezonatora (kanału stroikowego) i z rezonatorem za pomocą sondy mikrofonowej.

W tezie nr 2 autor rozprawy mówi, że w zależności od poprzecznych wymiarów stroika (kierunek prostopadły do płaszczyzny), w której wzbudzone są drgania, zmieniają się amplitudy składowych harmonicznych w widmie generowanego dźwięku w ten sposób, że im węższy stroik (wymiarzy stroików występujące w praktyce), tym większe amplitudy wyższych składowych harmonicznych w stosunku do amplitudy składowej podstawowej.

Pomiary przeprowadzone za pomocą sondy mikrofonowej potwierdziły, że amplitudy składowych harmonicznych w widmie generowanego dźwięku zmieniają się wraz ze zmianą wymiarów poprzecznych stroika. Jednak uzyskane wyniki wskazują, że w przypadku najwęższego stroika nie uzyskuje się takiego układu amplitud wyższych składowych harmonicznych w stosunku do amplitudy składowej podstawowej. Największą wartość współczynnika zawartości harmonicznych po uśrednieniu danych z różnych punktów pomiarowych otrzymano w przypadku stroika o średniej szerokości zarówno przy braku, jak i przy obecności kanału stroikowego.

Teza nr 3 wskazuje, że wielkość amplitud wyższych składowych harmonicznych w stosunku do składowej podstawowej wynika ze zróżnicowania przebiegu czasowego wartości całkowitego pola powierzchni, przez którą odbywa się przepływ przez stroik. Druga część tej tezy mówi z kolei o drganiach skrętnych zależnych od szerokości stroika. Ta część tezy została wykazana z wykorzystaniem wibrometru laserowego. Na podstawie wyników pomiarów autor wykazał, że postać i amplituda drgań zależy nieliniowo od szerokości stroika – tj. w przypadku średniego i szerokiego jest o rząd wielkości mniejsza niż w przypadku wąskiego. Dodatkowo – przy najmniejszej szerokości stroika – równocześnie z drganiami poprzecznymi występują drgania skrętne o tej samej częstotliwości i amplitudzie równej połowie amplitudy drgań poprzecznych. Autor rozprawy wyjaśnia, że stroik o średniej szerokości odkształca się w sposób najbardziej zbliżony do postaci pierwszego modu poprzecznego drgań własnych. Może to oznaczać, że wzrost amplitudy wyższych składowych harmonicznych w stosunku do składowej podstawowej generowanego dźwięku wiąże się nie wprost ze złożonym ruchem stroika, zaś drgania skrętne powodują, że przebieg zmian całkowitego pola powierzchni, przez którą odbywa się przepływ, staje się bardziej zbliżony do sinusoidalnego, co w efekcie pociąga za sobą spadek amplitud wyższych składowych harmonicznych sygnału akustycznego.

Kolejna (nr 4) i zarazem ostatnia teza odwołuje się do sposobu wytwarzania drgań skrętnych, zaś jej dowód opiera się na przeprowadzonych symulacjach

numerycznych trójwymiarowego modelu transjentów dźwięku, będącego wynikiem interakcji płynu i ciała stałego. Uzyskane wyniki potwierdzają, że cechy charakterystyczne przepływu turbulentnego związane ze wzbudzeniem drgań skrętnych występują jedynie w przypadku wąskiego stroika. Autor opisuje obserwacje wynikające z przeprowadzonych symulacji, w których można zauważyć odrywanie się strug przylegających do powierzchni stroika, które zachodzi periodycznie i niesymetrycznie względem płaszczyzny symetrii układu oraz wzajemnie oddziaływanie na siebie tworzących się wirów. Obserwacje te wyjaśniają, że w przypadku, gdy asymetrie w rozkładach ciśnienia wywieranego na powierzchni stroika przez przepływ pojawiają się okresowo, występuje zjawisko drgań skrętnych wymuszonych momentem skręcającym o wartości zmieniającej się sinusoidalnie z częstotliwością podstawową drgań stroika pobudzonego przepływem powietrza. Widać, że w początkowej fazie budowania się transjentu obecne są składowe różnicowe i sumacyjne częstotliwości modu skrętnego i częstotliwości podstawowej stroika wąskiego, związane ze stanem nieustalonym drgań wymuszonych, stanowiące pośrednie potwierdzenie oddziaływania periodycznie zmiennego momentu skręcającego.

Autor rozprawy przyznaje, że założenie, mówiące o zależności oddziaływania aerodynamicznego i amplitudy drgań skrętnych od szerokości stroika jest słuszne, ale jego część odnosząca się do większej zawartości harmonicznych w generowanym sygnale akustycznym okazała się nie być związana z większą amplitudą drgań skrętnych.

Wskazane we Wstępie trudności wynikające z ograniczeń zasobów potwierdziły się w przeprowadzonych symulacjach w praktyce. Należy jednak zauważyć, że nawet początkowe fragmenty transjentu wejściowego mają duży wpływ na barwę dźwięku, stąd **przeprowadzone symulacje – pomimo ograniczeń czasowych/zasobów – stanowią wartość poznawczą zjawisk powstających w trakcie budowania się dźwięku w przypadku idiofonów dętych.**

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową

Jak już wcześniej wspomniano, wykorzystanie symulacji do określenia przyczyny pomiaru drgań skrętnych stroika uważam za bardzo nośną propozycję w rozprawie, mającą duży potencjał badawczy. Jest to niewątpliwie jedno z ważniejszych dokonań doktoratu. Zastosowanie symulacji modelu numerycznego (przygotowane w oprogramowaniu Ansys) pozwala na wgląd w zjawiska aerodynamiczne zachodzące w obecności stroika, co byłoby trudne do uzyskania

poprzez pomiary – w tym przypadku aparatura pomiarowa może zakłócać pracę mierzonego układu. Jest to niewątpliwie samodzielny i oryginalny wkład autora.

Ponadto, w trakcie realizacji eksperymentów symulacyjnych wynikała z konieczności wprowadzania topologicznych zmian siatki obliczeniowej w modelu numerycznym, czego wstępnie opracowany program (wykorzystane oprogramowanie: OpenFOAM) nie mógł zapewnić i czego doktorant nie był w stanie przewidzieć. Uważam jednak, że przygotowany wstępnie model obliczeniowy może być przydatny do prostszych zastosowań i może stanowić już na obecnym etapie co najmniej częściowe osiągnięcie badawcze.

Autor we Wnioskach wskazuje na inne ograniczenia, związane m.in. z pomiarami i na ich podstawie formułuje propozycje dalszych prac badawczych, tj. wydłużenie czasu symulacji, uwzględnienie stroików o różnej częstotliwości podstawowej, konstrukcji (różne zakrzywienia, zróżnicowana szerokość stroika), stroiki odbijające – są to niewątpliwie możliwe kierunki rozwinięcia prowadzonych eksperymentów badawczych.

Sądzę, że we Wnioskach mogłoby się pojawić odniesienie do stanu wiedzy w kontekście bardziej ogólnego modelowania instrumentów muzycznych. Odniesienia do literatury znajdują się w rozdziałach wcześniejszych, ale w końcowym rozdziale mogłyby pełnić rolę podsumowania. Niewątpliwie dużym osiągnięciem autora rozprawy jest opracowanie modelu trójwymiarowego piszczałki organowej ze stroikiem i podbudowanie modelu numerycznego zbudowanym modelem idiofonu dętego wykorzystanym do pomiarów.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Autor pracy wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia całościowego ciągu logicznego, począwszy od przedstawienia obszaru tematycznego, motywacji, celu i zakresu badań, hipotez badawczych, które stanowią założenia eksperymentów, analizy teoretycznej poszczególnych elementów układu generacji dźwięku w idiofonach dętych, metod rozwiązywania problemów oraz wniosków wynikających z przeprowadzonych badań. Świadczy to o umiejętności sformułowania założeń na podstawie analizy stanu wiedzy oraz prowadzenia eksperymentu badawczego.

Należy zauważyć, że metodyka badań obejmuje zarówno budowę modelu idiofonu dętego, stworzenie trójwymiarowego modelu komputerowego odpowiadającego zbudowanemu modelowi instrumentu, przeprowadzenie wstępnych obliczeń na podstawie opisu matematycznego, przeprowadzenie numerycznej analizy modalnej stroików różnej szerokości, jak i weryfikację tezy nr 1 i 2 za pomocą pomiaru sondą mikrofonową, weryfikację tezy nr 3 przy wykorzystaniu wibrometru laserowego, wstępną i dokładną walidację za pomocą symulacji numerycznych,

prowadzące do weryfikacji tezy nr 4. Zarys metodyki badań uzupełniają plan symulacji (tab. 7.1) oraz dyskusja dotycząca siatek numerycznych, warunków brzegowych i parametrów symulacji (rozdz. 7.4.2) zarówno w kontekście płynów, jak i sprzężenia zwrotnego pomiędzy ośrodkami.

Rozprawa doktorska jest przygotowana poprawnie od strony redakcyjnej. Edycja pracy jest staranna, rysunki obrazujące wyniki analiz są w pełni czytelne, język rozprawy jest również poprawny. W pracy można znaleźć drobne usterki interpunkcyjne czy ortograficzne, które nie są jednak istotne z punktu widzenia oceny merytorycznej pracy.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

Tematyka analizy instrumentów muzycznych, a w szczególności piszczałek organowych jest ważna i istotna – przede wszystkim w kontekście poznawczym, ale również praktycznym - budowy instrumentów muzycznych. Świadczy o tym wcześniej przywołany projekt UE w obszarze rozprawy doktorskiej (tylko najwyżej ocenione projekty wygrywają i otrzymują finansowanie). Koszt budowy organów jest sprawą zasadniczą w kontekście konkurencyjności i opłacalności budowy klasycznych organów piszczałkowych (szkoła europejska organmistrzów versus amerykańska czy chińska). Ze względu na rosnącą cenę materiałów jedynym sposobem na obniżenie ceny – przy jednoczesnym osiągnięciu wysokiej jakości dźwięku instrumentu organowego – jest zmniejszenie kosztów pracy przy budowie organów. Wskazuje to na potrzebę stworzenia oprogramowania do symulacji działania piszczałek organowych stroikowych, co może zmniejszyć pracochłonność budowy instrumentu. Należy ponadto zauważyć, że procesy zachodzące w instrumentach muzycznych, w tym w idiofonach dętych są podbudowane uniwersalną teorią mechaniki płynów, przepływów i turbulencji płynów m.in. powietrza w duktach oraz sprzężeń pomiędzy ośrodkami (stałym i płynów), co ma dodatkowe bezpośrednie przełożenie dla nauk inżynieryjno-technicznych. Prowadzone badania wpisują się w szczególności w osiągnięcia dyscypliny elektronika oraz w dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika wg nowej klasyfikacji.

Podsumowanie

W mojej opinii, te najbardziej – już obecnie – wartościowe wątki rozprawy mogłyby stanowić rdzeń przyszłej publikacji na forum międzynarodowym.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa p. Bartosza Żłobińskiego **spełnia wymagania z wyraźnym nadmiarem** stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie (zgodnie z § 6.4 Rozporządzenia MNiSW z dnia 19.01.2018 r. Dz. U. z dn. 30.01.2018 r., poz. 2611)), ze względu na brak publikacji w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym, nie wnoszę jednak o jej wyróżnienie.

Wniosuję o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej p. mgra inż. Bartosza Żłobińskiego do publicznej obrony.**

prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki
Katedra Akustyki, Multimediiów i Przetwarzania Sygnałów
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechniki Wrocławskiej
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
tel. 609 226 785
e-mail: andrzej.dobrucki@pwr.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Żłobińskiego
pt. „ANALIZA GENERACJI DŹWIĘKU W IDIOFONACH DĘTYCH”

Podstawą wykonania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny „Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika” Politechniki Warszawskiej podjęta w dniu 23.11.2021.

Przewód doktorski mgr inż. Bartosza Żłobińskiego został wszczęty przed 30.04.2019 w dyscyplinie „Elektronika”. Obecnie dyscyplina ta nie istnieje, a tematyka z nią związana wchodzi w skład dyscypliny „Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika”. Tematyka rozprawy doktorskiej mieści się w ramach tej dyscypliny, chociaż rozprawa ma charakter interdyscyplinarny. Dotyczy ona generacji dźwięku poprzez pobudzenie stroika instrumentu muzycznego strugą powietrza dostarczanego ze źródła o stałym przepływie. Generacja dźwięku powstaje na skutek interakcji układu rezonansowego, jakim jest stroik z przepływem powietrza o prędkości w zasadzie niezależnej od czasu. Na skutek sprzężenia zwrotnego stroik traci stabilność i powoduje powstanie drgań (str. 55, 62 i 66 rozprawy). W tym sensie rozprawa powiązana jest z dawną dyscypliną „Automatyka” przez co jej związek z nową dyscypliną „Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika” staje się jeszcze bardziej ścisły. W sposób oczywisty rozprawa jest powiązana z dyscypliną „Nauki fizyczne” wchodzącą w skład dziedziny nauk ścisłych i przyrodniczych oraz z dyscypliną „Nauki muzyczne” w zakresie instrumentoznawstwa. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. Jan Żera.

Rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Żłobińskiego liczy 205 stron. Jest ona podzielona na 8 rozdziałów, z których pierwszy jest wstępem wprowadzającym w tematykę rozprawy, a ostatni jej podsumowaniem. Rozprawa zawiera 88 rysunków i 25 tabel (w tekście podstawowym). Na końcu rozprawy znajduje się wykaz literatury obejmujący 109 pozycji, wśród których nie ma prac Autora rozprawy. Spis ułożony jest w kolejności alfabetycznej. Na końcu rozprawy, po spisie literatury umieszczone są 2 dodatki. Praca zawiera ponadto streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz oznaczeń.

Boisne Koz

We wstępie Autor rozprawy przedstawia przedmiot badań, czyli idiofony dęte. Opisana jest podstawowa budowa tych instrumentów a także instrumenty, które można zakwalifikować do tej grupy. Są to bardzo popularne instrumenty: akordeon, harmonijka ustna, fisharmonia, niektóre typy piszczałek organowych i inne. Opisano różnicę w działaniu idiofonów dętych i aerofonów stroikowych. W idiofonach dętych stroik (płytką lub pręt) jest wibratorem, którego drgania wytwarzają falę akustyczną, zaś incytatorem, czyli elementem wzbudzającym drgania stroika jest strumień powietrza. W aerofonach stroikowych rolę incytatora pełni stroik, którego drgania rozdzielają strumień powietrza na impulsy, natomiast wibratorem jest słup powietrza drgający w rurze rezonansowej. Wygrywanie melodii polega na zmianie długości rury poprzez zatykanie i otwieranie znajdującej się w niej otworów, podczas gdy w idiofonach dętych do wytwarzania każdego dźwięku potrzebny jest oddzielny stroik o zadanej wartości częstotliwości rezonansowej. Proces strojenia polega na zmianie częstotliwości rezonansowej stroika poprzez dodanie bądź odjęcie niewielkiej masy na końcu stroika. Idiofony dęte mogą też zawierać rezonatory w postaci niewielkich komór lub rur rezonansowych. Rezonatory te służą jedynie do wzmacniania wytworzonego przez wibrator dźwięku. To przydługie wyjaśnienie dobrze definiuje przedmiot badań pracy doktorskiej. W dalszym ciągu opisana jest budowa idiofonów dętych. Z punktu widzenia badań przedstawionych w dalszej części pracy najważniejsze jest rozróżnienie między stroikami odbijającymi, mogącymi drgać tylko po jednej stronie rynienki i w jednym ze skrajnych położeniach niemal całkowicie ją zakrywającymi oraz stroiki przelotowe, poruszające się po obu stronach nieco większego otworu w rynience lub ramce. Badania Autora ograniczają się do stroików przelotowych, które obecnie występują znacznie częściej.

Na zakończenie rozdziału 1 przedstawiono tezę pracy. Składa się ona z 4 części, które warto tu przytoczyć, aby uzasadnić celowość podjęcia badań.

1. Zaklasyfikowane takich instrumentów jak akordeon, fisharmonia, harmonijka ustna i piszczałka języczkowa jako idiofonów dętych jest słuszne, ponieważ stroik pełni rolę wibratora i od jego konstrukcji w największym stopniu zależą parametry generowanego dźwięku.
2. W zależności od wymiarów poprzecznych stroika zmieniają się amplitudy składowych harmonicznych w widmie generowanego dźwięku w ten sposób, że im węższy stroik, tym większe są amplitudy składowych harmonicznych w stosunku do amplitudy składowej podstawowej.
3. Zróżnicowanie amplitud wyższych składowych harmonicznych wynika ze zróżnicowania przebiegu czasowego wartości całkowitego pola powierzchni, przez którą odbywa się przepływ powietrza przez stroik, ponieważ w zależności od wymiarów poprzecznych stroika zmienia się amplituda drgań skrętnych pobudzonego przepływem powietrza stroika w ten sposób, że im węższy stroik, tym większa amplituda drgań skrętnych
4. Drgania skrętne stroików są wzbudzone na skutek oddziaływań aerodynamicznych związanych z niestabilnościami przepływu i w zależności od wymiarów poprzecznych stroika te niestabilności zmieniają się w ten sposób, że im węższy stroik tym większe oddziaływanie aerodynamiczne wzbudzające drgania skrętne.

Pierwsza część tezy wydaje mi się oczywista. Przytoczone tu przykłady instrumentów, zakwalifikowanych do grupy idiofonów dętych od początku budowane były w inny sposób niż aerofony stroikowe i ich zasada działania była różna i znana. Świadczą też o tym informacje przedstawione w dodatku A dotyczące historii budowy instrumentów dętych, zarówno aerofonów, jak i idiofonów. Pod koniec rozdziału 2 Autor przedstawia przykłady instrumentów, których zasada opiera się zarówno na właściwościach rezonansowych stroika jak i drgań słupa powietrza, jednakże taki mieszany sposób generacji dźwięku nie ma większego praktycznego znaczenia. Z tego względu teza 1 pracy wydaje mi się zbędna, zaś rozważania w rozdziale 2, mające ją udowodnić sprowadzają się jedynie do określenia ilościowych zależności między drganiami stroika a cechami generowanego dźwięku. Części 2 - 4 tezy pracy wydają mi się istotne naukowo. Co prawda w literaturze opisane są badania wpływu szerokości stroika na drgania i generację dźwięku oraz wpływu drgań skrętnych stroika, ale brak jest przekonujących dowodów na ten wpływ. Szczególnie istotna wydaje mi się teza 4, ponieważ wg mnie jest ona sprzeczna z intuicją. Ja osobiście oczekiwałbym, że drgania skrętne łatwiej wzbudzają się w przypadku stroików szerokich, które można rozpatrywać jako struktury dwuwymiarowe - płyty niż w przypadku stroików wąskich, które są prętami (belkami) drgającymi w jednym wymiarze - długości. Udowodnienie przez Autora tej tezy w dalszej części pracy stanowi istotne osiągnięcie naukowe.

Rozdział 2 przedstawia teorię dotyczącą zjawisk fizycznych występujących podczas generacji dźwięku przez idiofony dęte. Podstawowe zjawiska dotyczą aerodynamiki oraz drgań struktur sprężystych ciała stałego oraz interakcje między drgającymi strukturami a przepływem powietrza. Dźwięk w idiofonach dętych jest generowany na skutek interakcji między przepływem powietrza a drgającą strukturą. Istotne są modele przepływu i aeroakustyki. Do rozpatrywania przepływu wystarczające jest stosowanie modelu płynu nieściśliwego, natomiast model ten jest niewystarczający do modelowania generacji dźwięku. Oprócz równań aerodynamiki i aerosprężystości Autor przedstawił również metody numeryczne mechaniki płynów, które w dalszym ciągu były stosowane do modelowania przepływu powietrza w idiofonie dętym. W dalszej części rozdziału Autor przedstawia teorię drgań układów mechanicznych stosowanych jako stroiki w opisywanych instrumentach. Tymi strukturami są przede wszystkim pręty (belki) oraz płyty. Tu należy się odnieść do stosowanej przez Autora terminologii. W pracy omawiane są wyłącznie struktury mające sztywność własną. Takie układy jednowymiarowe drgające drganiami poprzecznymi, w których uśrednia się przemieszczenia i siły w kierunku szerokości i grubości w literaturze przedmiotu nazywa się belkami, natomiast Autor stosuje nazwę „pręty”, przez które zwykle rozumie się struktury drgające podłużnie. Trzeba jednak powiedzieć, że taką samą jak Autor terminologię stosuje Żyszkowski. Autor używa też terminu „płyta prostopadłościenna” na określenie struktury dwuwymiarowej drgającej drganiami poprzecznymi. W płycie uśrednia się naprężenia i odkształcenia w kierunku trzeciego wymiaru, czyli grubości, dlatego powinno się raczej mówić o płycie prostokątnej. Typowym warunkiem brzegowym dla pręta (belki) występującym w stroikach jest utwierdzenie na jednym brzegu, natomiast dla płyty - utwierdzenie na jednej krawędzi. W rozdziale tym przedstawiono również ideę generacji drgań samowzbudnych w stroiku z użyciem źródła energii niezależnego od czasu, czyli w przypadku idiofonu dętego za pomocą strumienia powietrza. Strumień taki można

rozpatrywać w układzie mechanicznym jako ujemne tłumienie, co prowadzi do powstania w rozwiązaniu równania różniczkowego stabilnego cyklu granicznego. Najbardziej popularnym równaniem wykazującym te właściwości jest równanie van der Pola. Jest ono używane np. do modelowania drgań samowzbudnych układu składającego się z masy i sprężyny za pomocą sprzężenia go z poruszającym się pasem transmisyjnym za pomocą tarcia suchego. Za jego pomocą opisuje się też generację w elektronicznych generatorach drgań sinusoidalnych.

Ostatnia część rozdziału 2 poświęcona jest teorii generacji drgań stroika i wytwarzaniu przez niego dźwięku z użyciem modeli drgań i przepływu strugi powietrza wokół stroika. Opisany jest wpływ elementów konstrukcyjnych idiofonu takich jak sam stroik, rynecienka lub ramka, tuba rezonansowa oraz parametrów przepływu na efektywność generacji dźwięku. Zwrócono też uwagę na wpływ szerokości stroika. Parametr ten nie bierze udziału w generacji drgań stroika rozpatrywanego jako pręt, ale okazuje się, że dla szerszych stroików zawartość wyższych harmonicznych jest mniejsza. Potwierdza to 2 tezę rozprawy. W dalszych rozdziałach pracy problem ten jest dyskutowany głębiej. Cały rozdział 2 stanowi wprowadzenie do badań własnych Autora i w całości oparty jest o literaturę przedmiotu, czyli nie stanowi jego dorobku własnego. Trochę mnie razi, że rysunki zaczerpnięte z literatury, których opisy są po angielsku, te angielskie opisy pozostały, a cała praca redakcyjna Autora sprowadziła się do metody „kopiuj-wklej”. Trzeba jednak uczciwie przyznać, że źródła są zawsze starannie cytowane.

W rozdziale 3 zostały opisane metodyka i plan badań. Został zbudowany fizyczny model instrumentu ze stroikami o różnej szerokości oraz z rezonatorem i bez rezonatora. Za pomocą tego modelu przeprowadzono pomiary wibracyjne z użyciem wibrometru laserowego i akustyczne za pomocą sondy mikrofonowej. Pomiary akustyczne posłużyły do weryfikacji tez 1 i 2 rozprawy, natomiast za pomocą pomiarów wibrometrycznych weryfikowano tezę nr 3. Następnie stworzono model komputerowy instrumentu, odpowiadający modelowi fizycznemu. Za pomocą tego modelu przeprowadzono wstępne obliczenia i porównano ich wyniki z zależnościami analitycznymi przedstawionymi w rozdziale 2. Dokonano też analizy modalnej stroików o trzech różnych szerokościach. Ostatnimi etapami pracy były wstępna a następnie dokładna walidacja metod analizy za pomocą zaawansowanego oprogramowania umożliwiającego analizę modelu stroików o różnych szerokościach z uwzględnieniem przepływu i generacji fali akustycznych. Pozytywna walidacja zastosowanych metod była podstawą do weryfikacji punktu 4 postawionej tezy. W rozdziale 3 nie przedstawiono przebiegu i wyników badań. To zrobiono w kolejnych rozdziałach.

W rozdziale 4 dokonano wstępnych obliczeń modelu instrumentu na podstawie zależności analitycznych. Obliczono częstotliwości własne drgań stroika traktowanego jako pręt utwierdzony na jednym końcu drgający poprzecznie w płaszczyźnie z-x prostopadłej do szerokości pręta. Sama szerokość pręta była pominięta. Przeprowadzono również obliczenia częstotliwości drgań stroika traktowanego jako płyta utwierdzona na jednym brzegu (wzdłuż szerokości) i swobodna na pozostałych brzegach. Obliczenia przeprowadzono dla kilku różnych szerokości płyty. Wyniki dla pręta są najbardziej zbliżone dla wyników uzyskanych

dla płyty o największej szerokości, ale generalnie zgodność nie jest zbyt dobra. Autor nie próbuje wyjaśnić przyczyn niezgodności. Wyniki uzyskane w dalszej części pracy pozwalają wysnuć wniosek, że do analizy pracy stroika model pręta jest najlepszy. Dla modelu płyty wyznaczono również częstotliwości drgań skrętnych stroika. W dalszej części rozdziału 4 dokonano też oszacowania wartości rezonansu komory stroikowej, traktowanej raz jako rezonator Helmholtza, raz jako rezonator ćwierćfalowy i wreszcie jako rezonator prostopadłościenny. I tutaj częstotliwości rezonansowe są różne, co Autor pozostawia bez komentarza. Na zakończenie rozdziału 4 Autor szacuje prędkość przepływu powietrza, korzystając z równania Bernoulliego.

W rozdziale 5 przeprowadzona jest numeryczna analiza modalna drgań stroika.

Obliczenia przeprowadzono dla kilku sposobów drgań pręta:

- Drgania w kierunku osi z, w płaszczyźnie x-z. Jest to zwykle rozpatrywany sposób drgań stroika
- Drgania w kierunku osi y, w płaszczyźnie x-y. Moim zdaniem drgania w tym kierunku nie mają większego znaczenia dla pracy stroika, poza tym odpowiednie częstotliwości modów mogą być z łatwością uzyskane na podstawie wartości częstotliwości odpowiednich modów drgań w płaszczyźnie x-z w kierunku osi y, poprzez ich pomnożenie przez stosunek szerokości do grubości. Sprawdziłem to na wynikach podanych w tabelach 5.1 i 5.2. i są one zgodne.
- Drgania skrętne w płaszczyźnie y-z stroików. Te wyniki są ważne, ponieważ będą przydatne do weryfikacji 4 części tezy pracy.
- Drgania podłużne pręta. Odpowiednie częstotliwości modów są zbyt duże, aby wpływały na pracę stroika.

Rozdział 6 rozprawy przedstawia przeprowadzenie pomiarów fizycznego modelu stroika zgodnie z planem opisanym w rozdziale 3. Pomiary akustyczne wykonano za pomocą sondy mikrofonowej. Badano poziom ciśnienia akustycznego na wlocie modelu - przed stroikiem w wiatrownicy, oraz na wylocie za stroikiem gdy nie stosowano rezonatora lub za rezonatorem, gdy był on stosowany. Punkty pomiarowe dobierano tak, aby uzyskać największy stosunek sygnału do szumu. We wszystkich badanych punktach poziom sygnału harmonicznego generowanego przez stroik był większy od poziomu szumu aerodynamicznego. Badano wpływ szerokości stroika na poziom sygnału akustycznego poprzez pomiar dla trzech różnych szerokości stroika. Częstotliwości składowych podstawowych dla wszystkich trzech szerokości są bardzo zbliżone do tych, obliczonych dla modelu stroika jako pręta. Bardzo mało zależą one od szerokości stroika. Od szerokości stroika bardzo zależał współczynnik zawartości harmonicznych, zwłaszcza dla modelu instrumentu z rezonatorem. Nota bene, wzór (5.1) określający THD jest wzorem przybliżonym. Dla obliczeń dokładnych w przypadku dużych współczynników THD w mianowniku wzoru powinna pojawić się taka sama suma jak w liczniku, z uwzględnieniem jednak też składowej podstawowej. Wtedy THD nigdy nie przekroczy wartości 100%. Wyniki pomiaru THD są różne od przewidywanych. Z tego względu punkt 2 tezy pracy nie znalazł potwierdzenia. Niewielki jest za to wpływ rezonatora.

Pomiary wibracyjne z użyciem wibrometru laserowego przeprowadzono jedynie dla modelu instrumentu bez rezonatora, ze względu na to, że rezonator uniemożliwiał dostęp promienia świetlnego do pręta stroika. Nie jest to wada, ponieważ wpływ rezonatora akustycznego na drgania powinien być pomijalny. Pomiar wibrometrem potwierdził konkluzję wynikającą z pomiarów akustycznych, że stan ustalony drgań najszybciej występuje dla stroika wąskiego. Oprócz częstotliwości modów drgań, dobrze zgadzającymi się z tymi przewidzianymi przez obliczenia dla modelu pręta, występują też harmoniczne tych częstotliwości. Świadczy to o niewielkiej nieliniowości układu, ponieważ amplituda harmonicznych jest dużo mniejsza niż amplituda częstotliwości modalnych. Zawartość harmonicznych jest największa dla stroika o średniej szerokości, co potwierdza wyniki pomiarów akustycznych. Pomiar też wykazał, że w sposobach drgań występują też drgania skrętne, których amplituda jest największa dla stroika wąskiego. Uzyskano więc doświadczalne potwierdzenie 4 części tezy rozprawy. W stroiku szerokim występuje natomiast wyraźne wybrzuszenie amplitudy drgań w odległości 8 mm od końca. Być może konstruktorzy stroików przed wielu laty zastosowali wybrzuszenie statycznego kształtu stroika w celu uwzględnienia tego w postaci drgań.

Rozdział 7 jest najdłuższym rozdziałem pracy (nie licząc rozdziału 2, który został opracowany na podstawie literatury). W rozdziale 7 przedstawiono wyniki najbardziej zaawansowanych symulacji modelu idiofonu dętego, obejmującego stroik, wiatrownicę oraz rezonator (jeśli występuje) z uwzględnieniem sprzężenia między przepływem powietrza, wytworzonymi drganiami samowzbudnymi stroika oraz generowanym przez te drgania dźwiękiem. Ze względu na bardzo długi czas obliczeń w obliczeniach zrezygnowano z modelowania instrumentu ze stroikiem o średniej szerokości. Rozumiem Autora rozprawy, który dążył do jak najszybszego zakończenia pracy, żałuję jednak, że nie zrobiono tego modelowania, ponieważ dla stroika średniego zaobserwowano w wyniku pomiarów zjawiska dość nietypowe, takie jak znaczne zwiększenie zawartości harmonicznych, które nie występowało dla stroików o skrajnych szerokościach. Pominięcie tego w zaawansowanym modelu powoduje, że wyjaśnienie fizyczne tego zjawiska w dalszym ciągu czeka na zbadanie. Symulację podzielono na dwa etapy. W pierwszym dokonano pewnych uproszczeń, w celu walidacji obliczeń przez porównanie ich z wynikami pomiarów. W drugim etapie dokonano zaawansowanego modelowania zjawisk fizycznych występujących w instrumencie za pomocą oprogramowania ANSYS. Na podstawie wyników I etapu stwierdzono, że drgania stroika ustalają się szybko i wystarczy rozpatrywać tylko da pierwsze okresy, co znacznie skraca czas obliczeń. Przedstawiono parametry siatki numerycznej dla płynu w przypadku interakcji ze stroikiem szerokim i wąskim. Parametry te zestawiono w tabelach 7.6 i 7.7. Szkoda jednak, że nie wyjaśniono znaczenia niektórych parametrów, takich jak jakość elementów, prostokątowość siatki, skośność lub współczynnik proporcjonalności. Podano też parametry samego modelowania, które wybrano z odpowiednich modułów oprogramowania, dotyczą one np. ściśliwości lub lepkości, chropowatości powierzchni ciała stałego, rodzajów warunków brzegowych itd. Wybrano też po przeprowadzeniu dyskusji model turbulencji SST k- ω . Wybrane warunki brzegowe dotyczyły zadanych wartości ciśnień i prędkości. Aby zbadać transjenty przebiegów akustycznych, wybrano też odpowiednie warunki początkowe w ten sposób, aby odpowiadały możliwie dokładnie warunkom stosowanym podczas pomiarów. Obliczano przebiegi czasowe i widma wychyleń stroika (zarówno szerokiego, jak i

wąskiego). Zgodność wyników częstotliwości rezonansowych stroika uzyskane z symulacji i z pomiarów jest średnia. Dla pierwszego modu drgań błąd względny symulacji w stosunku do pomiarów wynosi 7,7% dla stroika szerokiego oraz 19,3% dla stroika wąskiego. Przyczyną różnic może być uwzględnienie jedynie dwóch pierwszych okresów drgań. Kolejna symulacja dotyczyła ciśnienia i prędkości przepływu powietrza. Rozkłady tych wielkości po obu stronach stroika obliczano w dwóch chwilach czasowych 15 i 22 ms, odpowiadających maksymalnemu wychyleniu stroika i jego położeniu w płaszczyźnie ramki. Różnica ciśnień na wylocie dla obu tych położeni wynosi ok 200 Pa i jest bezpośrednią przyczyną generacji fali akustycznej. Symulacje przebiegów ciśnienia akustycznego pokazały, że nie ma istotnych różnic dla stroika szerokiego i wąskiego. Wykresy widm ciśnienia akustycznego, przedstawione na rys. 7.20 obliczono w szerokim zakresie częstotliwości 0-5000 Hz. Ponieważ częstotliwość modu podstawowego wynosi kilkadziesiąt Hz, warto byłoby ten zakres ograniczyć np. do 200 Hz, aby zobaczyć składową podstawową ciśnienia akustycznego. Obliczono również przebiegi czasowe sił aerodynamicznych działających na stroik i stwierdzono, że są one proporcjonalne do powierzchni stroika, czyli rosną wraz z jego szerokością. Jest to logiczne. Największa wartość siły występuje, gdy otwór w ramce jest prawie zamknięty. Zmienność siły aerodynamicznej jest zgodna w fazie z wychyleniem stroika. Wykonano też symulacje linii prądu przepływu powietrza wokół stroika. Przebiegi te są zupełnie różne dla stroika szerokiego i wąskiego. Dla stroika szerokiego przepływ wzdłuż długości jest prawie laminarny, podczas gdy dla stroika szerokiego tworzą się wiry w płaszczyznach prostopadłych y-z do osi x wzdłuż całej długości stroika, zwłaszcza w położeniu stroika w płaszczyźnie ramki. Inaczej wygląda sytuacja w płaszczyźnie z-x dla wartości y=0. W tym przypadku większe wiry tworzą się dla stroika szerokiego. Obliczenia ciśnienia wywieranego na stroik pokazują, że rozkłady wykazują wyraźną asymetrię występującą zwłaszcza w środkowej części stroika. Może to powodować tworzenie się momentu skręcającego, co prowadzi do tworzenia się modów skrętnych. Rzeczywiście, zestawienie wyników rozkładów drgań na jego osi symetrii i na krawędziach pokazuje wyraźną różnicę amplitud dla częstotliwości własnych modów skrętnych. Różnica ta jest większa dla stroika wąskiego, co świadczy o tym, że moment skręcający jest w tym przypadku większy. Potwierdza to punkt 4 tezy rozprawy.

Rozdział 8 rozprawy doktorskiej zawiera wnioski i deklaracje udowodnienia wszystkich punktów tezy. Pierwszy punkt tezy był moim zdaniem banalny i oczywiście został udowodniony. Trudno mówić o udowodnieniu drugiej części tezy. Teza ta głosiła, że dla węższych stroików większa jest zawartość harmonicznych w widmie generowanego dźwięku. Tymczasem pomiary pokazały, że największy THD występuje dla stroika o średniej szerokości. Brak modelowania tego stroika pozostawia moim zdaniem tę tezę otwartą. Tezę trzecią o generacji modów skrętnych o amplitudach tym większych im węższy stroik udowodniono za pomocą pomiarów natomiast tezę 4 stanowiącą, że przyczyna tworzenia się wymuszającego momentu skręcającego jest aerodynamiczna, udowodniono badaniami modelowymi na zaawansowanym modelu instrumentu. Udowodnienie tej czwartej tezy uważam za najważniejsze osiągnięcie rozprawy.

Wykonanie rozprawy doktorskiej wymagało od Doktoranta dużej wiedzy w zakresie mechaniki płynów, teorii drgań oraz instrumentoznawstwa. Wymagało też umiejętności posługiwania się zaawansowanym, specjalistycznym oprogramowaniem oraz znajomością

technik pomiarowych w akustyce i wibrometrii. Rozprawa nie jest pozbawiona wad. Najważniejszą jest brak wyjaśnień dotyczących rozbieżności wartości częstotliwości rezonansowych w modelu płytowym i prętowym drań stroika. Nie miało to w końcowym rozrachunku wpływu na wyniki modelowania, ponieważ wyniki modelowania za pomocą modelu jednowymiarowego (prętowego) okazały się być zgodne z wynikami pomiarów. Niemniej jednak model płytowy stroika chyba zawiera jakieś błędy i nie jest dostatecznie przemyślany. W takiej sytuacji nie było potrzeby umieszczania go w pracy. Podobna sytuacja jest dla częstotliwości rezonansowych komory stroikowej. Modelowanie za pomocą rezonatora Helmholtza, za pomocą rezonatora ćwierćfalowego oraz rezonatora prostopadłościennego dało różne wyniki. Brak jest odniesienia się Autora do tych rozbieżności. Moim zdaniem, w modelu rezonatora prostopadłościennego warunki brzegowe panujące w komorze stroikowej są nieadekwatne. Dla dwóch pozostałych modeli nie uwzględniono poprawek otworu, a moim zdaniem są one w tym przypadku istotne.

Redakcja pracy jest niezbyt staranna. Uprzednio już wytknąłem, że rysunki z literatury anglojęzyczne zostały wklejone do pracy bez jakichkolwiek zmian. Wg mnie, w rozprawie doktorskiej napisanej po polsku, powinny być one przerysowane i zaopatrzone w polskie opisy. W pracy występuje sporo literówek, których tu nie będę wymieniał. Na str. 118, 9 wiersz od dołu występuje powołanie na rys. 6.8b i 6.8c. W tym drugim przypadku powinno być 6.9b. Te wady nie wpływają jednak na zasadniczo wysoką ocenę pracy.

Rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Żłobińskiego pt. „Analiza generacji dźwięku w idiofonach dętych” potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie „Elektronika” (obecnie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika) oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Tym samym rozprawa spełnia wymagania art. 187 ust. 1-2 Ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, w związku z czym wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Rozprawę zaliczam do kategorii „spełniająca wymagania”.

Audyt Dobacz

Wrocław, 9 stycznia 2022