

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](mailto: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.

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 położań 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 harmoniczných w widmie generowanego dźwięku w ten sposób, że im węższy stroik, tym większe są amplitudy składowych harmoniczných w stosunku do amplitudy składowej podstawowej.
3. Zróznicowanie amplitud wyższych składowych harmoniczných wynika ze zróznicowania 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 aerodynamiczných 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, rynienka 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. Pomiar akustyczny 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 harmonicznego, 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 doświadczone 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 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, prostopadłość siatki, skośność lub współczynnik proporcjonalności. Podano też parametry samego modelowania, które wybrano z odpowiednich modułów oprogramowania, dotyczące np. ścisłości lub lepkości, chropowatości powierzchni ciała stałego, rodzajów warunków brzegowych itd. Wybrano też po przeprowadzeniu dyskusji model turbulencji SST  $k-\omega$ . 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. Obliczono 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 położen 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 prowadzić będzie 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 harmoniczných 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