

dr hab. inż. Sławomir KOSIŃSKI¹
Ł Ó D Ź

RECENZJA

pracy doktorskiej mgra Jarosława GILA pt.: „*Ocena izolacyjności akustycznej przegród budowlanych w placówkach edukacji muzycznej*”

Uwagi ogólne

W pracy rozważane są zagadnienia wymienione w tytule w przypadku, gdy źródłem energii są generowane przez instrumenty muzyczne fale akustyczne propagujące się w powietrzu i transmitowane przez pojedyncze i wielokrotne przegrody. Izolacyjność akustyczna przegrody określa jej odporność na przenikanie przez nią energii akustycznej i jest funkcją częstotliwości fali nazywaną charakterystyką izolacyjną przegrody. Charakterystyki są zwykle określane w przedziale częstotliwości 50÷3150 Hz w pasmach tercjowych lub oktawowych. Dla zapewnienia wybranego komfortu akustycznego (wg.NR) charakterystyka przegrody oceniana jest przez porównanie poziomu dźwięku w pomieszczeniu odbiorczym w całym przedziale częstotliwości z wartościami wybranej krzywej granicznej NR w tym przedziale.

Tematyka podjęta w pracy dotyczy badań izolacyjności akustycznej przegród przy występowaniu szerokiego spektrum częstotliwości, które finalnie mają dać efekt aplikacyjny w postaci określenia warunków zadowalającej izolacyjności akustycznej w całym przedziale częstotliwości lub prostszych przybliżonych kryteriów dla oceny tej własności, typowych dla praktyki inżynierskiej, sprowadzających się do wyznaczenia i oceny jednoliczbowego ważonego wskaźnika. Jest to zagadnienie złożone wymagające dużej liczby analiz porównawczych dotyczących wyników badań terenowych i laboratoryjnych jak oraz wyników otrzymanych z symulacji komputerowych.

Wyniki przedstawione w pracy mają duże znaczenie poznawcze i należą do szerszej i stale dynamicznie rozwijającej się dziedziny: akustyki budowli. Zagadnienia dotyczące oddziaływania fal akustycznych ze strukturami sprężystymi w aspekcie stricte budowlanym były i są badane przez wielu autorów. Aktualnie tematyka ta jest rozwijana w wielu ośrodkach naukowych o czym świadczy duża liczba publikacji, referatów konferencyjnych i prac doktorskich z tego zakresu. Jako przykłady można wymienić: Katholieke Universiteit Leuven, University of Liverpool, IPPT PAN W-wa.

Opis pracy

Istotę pracy stanowi sformułowanie kryteriów doboru izolacyjności akustycznej przegród budowlanych różnych typów, ze szczególnym uwzględnieniem ich przydatności do zastosowania w pomieszczeniach, gdzie odbywają się ćwiczenia z instrumentami muzycznymi. Pomieszczenia, takie są z reguły małe, a zlokalizowane w nich źródła dźwięku jakimi są instrumenty muzyczne mają bardzo zróżnicowane poziomy mocy i widma częstotliwości. W poszukiwaniu prostego kryterium dla oceny izolacyjności akustycznej takich pomieszczeń wykorzystano metodę krzywych przedstawiających zależność wskaźnika hałasu od średnich częstości oktawowych (Noise Rating Curves – NR). Jako graniczną dla komfortu akustycznego w tego typu pomieszczeniach przyjęto

¹ emeryt, były nauczyciel akademicki Politechniki Częstochowskiej i Łódzkiej

krzywą NR 25. Podstawowym celem pracy jest analiza wybranych metod oceny izolacyjności akustycznej ścian pomieszczeń wymienionych w jej tytule oraz opracowanie nowego kryterium w tym zakresie pozwalającego zachować minimalny poziom hałasu tła w szerokim zakresie częstości dźwięku generowanego przez instrumenty muzyczne. Wyniki symulacji numerycznych porównano z rzeczywistymi wynikami pomiarów formułując pewne hipotezy dla warunków doboru izolacyjności badanych przegród.

Przybliżenie podstaw akustyki jest treścią rozdziału 2. Przypomniano podstawowe definicje i pojęcia, ujednolicając oznaczenia. Podstawy teoretyczne symulacji numerycznych oraz metody określania izolacyjności akustycznej przegród od dźwięków powietrznych przy uwzględnieniu bocznego przenoszenia omówiono w podrozdziałach 2.2 i 2.3. Zwrócono także uwagę na ograniczenia zastosowanych metod w przypadku występowania częstości granicznej oraz transmisji rezonansowej i sprzężenia modalnego (str.33). Należy podkreślić, że również dawne algorytmy na równi z nowymi stają się obecnie bardzo atrakcyjne w czasie powszechnego stosowania technik komputerowych i symulacji

W dwóch kolejnych rozdziałach 3 i 4 przedstawiono wymagania normowe oraz uzyskane dotychczas wyniki. W pracy zostały obszernie omówione istniejące metody wyznaczania izolacyjności akustycznej przegród budowlanych różnych typów i związane z nimi przepisy i wymagania normowe, krajowe i zagraniczne. Autor cytuje także wcześniej (rozd.1.1, str.16) prace omawiające kryteria izolacyjności akustycznej pomieszczeń muzycznych nie objęte normami (por. [21], [33]) uważając je jednak za nieadekwatne dla omawianego zagadnienia. **Później (por. str. 39-41) Doktorant cytuje obszernie ustalenia Millera z pracy [21] i wzorując się na jego badaniach z zakresu poziomu hałasu w systemach wentylacyjnych, przyjmuje wskaźnik NR 25 jako kryterium poziomu hałasu tła dla badań opisanych dalej w pracy.** Zakres pracy magisterskiej Autora [7] i uzyskane w niej wyniki mające dalej zastosowanie zostały krótko opisane w podrozdziale 4.2.

Rozdział 5 zawiera opisy metodologii pomiarów terenowych i laboratoryjnych oraz charakterystykę profesjonalnych programów użytych do symulacji numerycznych. W tabelach zestawiono aparaturę użytą do pomiarów, opisano pomiary poziomów dźwięku instrumentów muzycznych, pomiary terenowe i laboratoryjne oraz podano dane dotyczące zastosowanego oprogramowania i ich struktury, zestawiając wymagane dane wejściowe. Do obliczeń numerycznych użyto programów INSUL i BASTIAN. Symulacja numeryczna sprowadza się do dwóch etapów. W pierwszym używając programu INSUL obliczano materiałową izolacyjność poszczególnych przegród, a następnie w drugim etapie wykorzystując program BASTIAN, który daje możliwość symulowania zachowania nie tylko przegrody lecz także jej otoczenia, po wprowadzeniu opisu przegrody, przegród bocznych, połączeń i wymiarów pomieszczeń obliczano izolacyjność akustyczną przy uwzględnieniu przenoszenia bocznego..

W rozdziale 6 stanowiącym połowę pracy prezentowane są wyniki wszystkich przeprowadzonych badań wraz z wnioskami częściowymi. Przedstawiono wyniki pomiarów poziomu dźwięku instrumentów muzycznych i głosu ludzkiego z podziałem na frazy, a następnie w tabeli 6.2 podano uśrednione poziomy ciśnienia akustycznego zarówno w tercjowych pasmach częstotliwościowych $L_{eq,T}$ jak też dla całkowitego poziomu dźwięku A , $L_{Aeq,T}$. Wobec trudności z uzyskaniem widma poziomu dźwięku charakteryzującego całą klasę instrumentów muzycznych podzielono ją na trzy grupy, zakładając przynależność każdego instrumentu do jednej grupy. **Dla każdej grupy wyznaczono maksymalne wartości poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych i aproksymowano liniowo zależność $L_{eq,T}(f)$, uzyskując dla każdej z trzech grup instrumentów dość zróżnicowane widma maksymalnych wartości(rys.6.1a), które następnie zastąpiono liniowymi obwiedniami (złożonymi z dwóch i trzech odcinków) nazywając je widmami uproszczonymi (rys.6.1b).** Uproszczenie takie prowadzi do

znacznych różnic w skrajnych pasmach częstotliwości, a punkty przecinania się obu rodzajów widm nie pokrywają się.

Przyjmując do obliczeń widma uproszczone oraz poziom hałasu tła NR 25 można wyznaczyć minimalną różnicę poziomów ciśnienia $D_{min}(f)$ (rys.6.2a) między pomieszczeniami oraz minimalną izolacyjność akustyczną właściwą przegrody $R_{min}(f)$ (rys.6.2) w rozpatrywanym przedziale częstotliwości. Postępowanie takie w przypadku obliczeń wartości ważonych $D_{min,w}$ i $R_{min,w}$ dla silnie zróżnicowanych rozkładów wartości D_{min} i R_{min} prowadzi do niedoszacowania jednoliczbowych wskaźników ważonych. Wpływ na wartości ważne, mają bowiem małe wartości z niskich pasm częstotliwości, a pozostałe w innych pasmach niewiele wpływają na wynik. **Charakterystyki odnoszące się do minimalnej wartości izolacyjności R_{min} czy różnicy poziomów D_{min} , pokazują, że każda grupa instrumentów muzycznych generuje inne kryteria dla izolacyjności akustycznej. Szczegóły omówiono we wnioskach do podrozdziału 6.1.1.**

Aby sformułować przybliżone częściowe kryteria pozwalające osiągnąć poziom NR 25 w pomieszczeniu odbiorczym dokonano pomiarów izolacyjności akustycznej w szeregu modelowych konstrukcjach, dokonując porównań z wynikami uzyskanymi dla tych przypadków z symulacji komputerowych, przy użyciu programów BASTIAN i INSUL. **Wśród prezentowanych przykładów najciekawszym i mającym dobry opis techniczny przykładem jest analiza wyników adaptacji pomieszczeń dla Instytutu Muzyki UZ. Rys.6.8 przedstawia porównanie wyników izolacyjności akustycznej właściwej, przybliżonej przed i po wykonaniu prac adaptacyjnych. W całym paśmie częstotliwości nastąpiło polepszenie izolacyjności średnio o 7-9 dB.**

W podrozdziałach 6.5 i 6.6 przedstawiono charakterystyki dotyczące izolacyjności właściwej R , oraz przybliżonej R' uzyskane z symulacji komputerowych dla wielu rodzajów przegród istniejących i projektowanych. W przypadku ścian ceglanych dokonano także porównania z rzeczywistymi wynikami pomiarów. Wartości izolacyjności uzyskane z pomiarów i symulacji w całym paśmie częstotliwości mogą różnić się nawet ok. 15-20 dB (por. rys. 6.9 i 6.10).

Podrozdział 6.6 jest w pewnym sensie testem numerycznym, polegającym na obliczaniu wartości R i R' dla ośmiu modelowych przypadków ścian (rys.6.12-6.19) przy użyciu programów odpowiednio INSUL i BASTIAN i porównaniu otrzymanych wyników. Wartości R i R' w wielu przypadkach są prawie zgodne na znacznej części przedziału częstości, lecz występują różnice ok. 10 dB w pasmach o różnej długości z których jedno ma długość całego przedziału (rys.6.15). Można tu postawić zasadnicze pytanie, w jakim stopniu różnice te zależą od struktury i materiałów kompozytowych ścianek, a w jakim od założeń i metod przyjętych w obu programach komputerowych. Przydatne mogą tu być tylko wyniki pomiarów obu parametrów izolacyjności w warunkach laboratoryjnych oraz wyniki numeryczne z innych programów komputerowych² (rys.6.12-6.19). Rozdział ten nie kończy się żadnymi wnioskami.

W podrozdziale 6.7 Autor przedstawił możliwości badawcze nowego laboratorium LIA UZ³. Opisał komory badawcze, wyposażenie oraz rodzaje i zakres badań jakie można w nim przeprowadzać. Laboratoryjne badania testowe dotyczą izolacyjności akustycznej dwóch ścian kompozytowych (por. rys.6.28 i 6.29). Dla pierwszej ważony wskaźnik $R_{max,w}=70$ dB i wynik taki stanowi dobrą przesłankę do ubiegania się o akredytację placówki. Dla ściany drugiej porównano wyniki badań laboratoryjnych i wyniki z symulacji numerycznych dla pełnej ściany (rys.6.29) oraz dla ścianki ceglanej będącej jej częścią (rys.6.30). Wartości z wersji numerycznej są w obu przypadkach zawyżone.

² REDUCT, ENC, WINFLAG

³ Laboratorium Izolacyjności Akustycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego

Wykorzystując narzędzia programu INSUL służące do modelowania struktury ścian Autor wprowadził bardziej realistyczny model ścianki ceglanej (uwzględniający spoiny) i otrzymał lepszą korelację wyników najlepiej widoczna na rys. 6.31. Porównanie rys.6.32 z rys.6.18 pokazuje, że urealnienie struktury ściany daje zbliżone wartości R i R' w przedziale 200-3150 Hz, lecz znacznie bardziej wpływa na ich wartości, maksima np. różnią się o ~ 15 dB. Wnioski do podrozdziału 6.7.4 są bardzo istotne, gdyż wyjaśniają przyczyny powstawania różnic w wynikach z badań i symulacji dla ścian opisanych w tym podrozdziale.

W podrozdziale 6.8 przedstawiono widma poziomego dźwięku w pomieszczeniu odbiorczym dla omawianych poprzednio 12-tu przypadków ścian, otrzymane na podstawie pomiarów i symulacji dla przybliżonych widm poziomego dźwięku dla każdej z trzech grup instrumentów muzycznych. Uwzględniono zarówno transmisję bezpośrednią jak też transmisję z przenoszeniem bocznym. Moim zdaniem jest to najbardziej istotna część pracy. Uproszczone widma L_1 trzech grup instrumentów są wspólne dla wszystkich analiz. Natomiast widmo poziomego dźwięku w pomieszczeniu odbiorczym L_2 jest obliczane dwojako: na podstawie pomierzonej różnicy poziomów D uzyskanej z pomiarów dla ścian badanych w terenie (rys. 6.34-6.37) oraz w pozostałych przypadkach (rys.6.38-6.45) na podstawie ich izolacyjności właściwej R i R' oraz pola ściany A i jej równoważnej powierzchni dźwiękochłonnej S (por. (6.6) i (6.7)). Na odwzorowania poziomów dźwięku L_2 nałożono rodzinę krzywych NR (rys. 6.34-6.45). W przypadku ściany 11-tej uwzględniono obie wersje obliczeń: symulacyjną i na podstawie pomiarów laboratoryjnych (por. rys 6.44a,b,c), otrzymując najbardziej pełny obraz dla przeprowadzonej analizy. Na każdym z rysunków podano oszacowania i oznaczono krzywe graniczne dla każdego z trzech widm uproszczonych. Dla założonych standardów akustycznych odpowiadających NR 25 konstrukcja ściany 12 spełnia wymogi izolacyjności, a przy uwzględnieniu przenoszenia bocznego tylko nieznacznie je przekracza. W każdym z rozpatrzonych przypadków, przy uwzględnieniu przenoszenia bocznego komfort akustyczny prawie zawsze się pogarsza, wyjątek stanowią konstrukcje 5, 6, 7 w zakresie odpowiadającym instrumentom dętym. Uzyskane wyniki posumowano i zestawiono w Tabeli 6.35, podając dla każdej rozważanej konstrukcji wskaźniki hałasu NR w pomieszczeniu odbiorczym dla trzech grup instrumentów i dla transmisji dźwięku bezpośredniej i z wpływem przenoszenia bocznego. Zaznaczono wartości $NR \leq 25$.

Analizując zestawienia wskaźników NR w pomieszczeniu odbiorczym dla transmisji bezpośredniej i z przenoszeniem bocznym dla przegród które osiągają najniższą wartość R_w przy zapewnieniu poziomu dźwięku NR 25, można wyznaczyć minimalną ważoną izolacyjność akustyczna właściwą dla poszczególnych grup instrumentów. Wartości te wraz z widmowymi wskaźnikami adaptacyjnymi C_A i C_B (por.[7]) pozwalają na sformułowanie warunków dla jednoliczbowych wskaźników oceny izolacyjności akustycznej przegrody (str. 129-130). Na końcu podrozdziału 6.8 przedstawiono szczegółowe wnioski i uwagi odnośnie izolacyjności akustycznej i warunków eksploatacji oraz zastosowań dla prezentowanych wcześniej przypadków dwunastu konstrukcji przegród, jak również kryteria oceny wskaźników izolacyjności akustycznej właściwej i przybliżonej.(str. 136).

Dyskusja końcowa dotyczy dwóch zagadnień: poziomów dźwięku generowanych przez współczesne instrumenty muzyczne i doboru przegrody o odpowiedniej izolacyjności akustycznej oraz testów dla LIA UZ zapewniających akredytację.

Wnioski końcowe odnoszą się do wykonanych pomiarów terenowych, laboratoryjnych i symulacji komputerowych dla zaproponowanych rozwiązań przegród. Obejmują także uwagi odnośnie kryteriów izolacyjności akustycznej dla rozważanego w pracy zagadnienia, które są trudniejsze do spełnienia niż ujęte obecnie w normach.

Kierunki dalszych badań Autor widzi w badaniach izolacyjności od dźwięków uderzeniowych i badaniach ustalających wpływ okładzin akustycznych ścian na przenoszenie boczne.

Wykaz literatury na końcu pracy zawiera obszerną literaturę monograficzną przedmiotu, istotne pionierskie artykuły z zakresu akustyki pomieszczeń, wyczerpujący wykaz norm oraz adresy internetowe stron, producentów ścian działowych.

Ocena pracy

Badania opisane w pracy mają charakter badań aplikacyjnych i są próbą rozwiązania dość specyficznego lecz istotnego zagadnienia izolacyjności akustycznej przegród budowlanych od dźwięków powietrznych w przypadku, gdy źródłami dźwięku są instrumenty muzyczne charakteryzujące się bardzo kontrastowymi poziomami mocy i widmami częstotliwości. Sformułowanie jednolitych kryteriów izolacyjności dla projektowania ścian przy takim wyborze źródeł jest trudne do ustalenia. Generalnie można jedynie przypuszczać, że kryteria takie powinny przewyższać zalecenia dla pomieszczeń mających już obowiązujące przepisy normowe oraz, że stosowane są studialne indywidualne rozwiązania dla poszczególnych obiektów o tym charakterze, które nie są ogólnie dostępne.

Metody zaproponowane w pracy prowadzą do ustalenia przybliżonych zaleceń projektowych do stosowania w tego typu obiektach. Są to złożone procedury z różnych dziedzin: akustyki pomieszczeń i instrumentów muzycznych, zastosowań metod komputerowych do symulacji numerycznych przy transmisji dźwięku przez przegrody oraz budownictwa w zakresie doboru materiałów i projektowania przegród budowlanych. **Wyniki otrzymane z zastosowanych procedur symulacyjnych wraz z wynikami pomiarów terenowych i laboratoryjnych pozostają w dobrej zgodności, co świadczy o dobrym ich wyborze, a w rezultacie o dużej wiedzy teoretycznej i doświadczeniu Autora.**

Bardzo ciekawe założenia i postulaty przydatne dla uzyskania rozwiązań omawianego zagadnienia zostały sformułowane przez Autora w rozdziale 6. Podział instrumentów muzycznych na trzy klasy reprezentowane finalnie przez widma uproszczone, przy ustalonym empirycznie poziomie hałasu tła NR 25 pozwala na szybkie określenie przydatności akustycznej wybranej przegrody w całym przedziale częstotliwości emitowanego dźwięku dla wybranej grupy instrumentów.

Zauważyłem także, że wykresy przedstawione na rys. 6.38-6.45 można także interpretować analitycznie jako obrazy zbioru oryginałów, utworzonego przez trzy widma uproszczone (rys. 6.1b) przy ich „filtracji” przez przegrody, zgodnie z wzorami transformacyjnymi (6.5)-(6.7). Z takiej interpretacji wynika od razu prawidłowość, zgodnie z którą zarówno widma uproszczone, jak też ich obrazy po transformacji przecinają się w trzech punktach dla tych samych wartości częstotliwości. W przypadku widm poziomu dźwięku uzyskanych w wyniku pomiarów w terenie rys. 6.34-6.37 prawidłowość ta nie jest w pełni zachowana. Występują dwa punkty przecięcia widm dla których wartości częstotliwości są prawie równe wartościom z symulacji numerycznych, lecz brak punktu przecięcia widm instrumentów perkusyjnych i innych. Porównując wyniki dla konstrukcji 11-tej otrzymane przy zastosowaniu różnych metodologii rys.4.64b i 4.64c można stwierdzić, że obrazy obu widm są różne lecz ich punkty przecięcia mają zbliżone wartości częstotliwości.

Za oryginalny, pomysłowy i bardzo skuteczny należy uznać pomysł Autora dotyczący analizy widm instrumentów, które po ich zniekształcaniu przy transmisji przez przegrody są następnie porównywane z krzywymi NR, umożliwiając

sformułowanie odpowiednich wniosków i ustalenie kryteriów oceny jednoliczbowych wskaźników oceny izolacyjności akustycznej.

Z analizy widm (rys. 6.34-6.45), wynika, że najmniejsza wymagana izolacyjność ścian dla założonego maksymalnego poziomu hałasu tła NR 25 zgodnie z tabelą 6.35 występuje dla konstrukcji 11 i 12 dla grupy instrumentów odpowiednio innych oraz perkusyjnych i dętych. Są jednak pewne drobne niuanse, dla konstrukcji 11 widmo instrumentów innych na rys. 6.44c leży poniżej krzywej NR 25 i jest prawie do niej styczne, a na rys. 6.44b na małym odcinku niskich częstotliwości przekracza krzywą graniczną NR 25 osiągając wartość NR 28. W przypadku konstrukcji 12 na rys. 6.45b w tym samym mniej więcej zakresie częstotliwości występuje małe przekroczenie wartości granicznej dla widma instrumentów perkusyjnych do wartości \approx NR 26, podczas, gdy widma instrumentów innych i dętych są usytuowane poniżej krzywej granicznej. Obie konstrukcje 11 i 12 mają więc najmniejszą z możliwych wartość R_w (styczność lub „bliskość sąsiedztwa” z NR 25) dla zapewnienia we wskazanych grupach instrumentów komfortu dźwięku w standardzie NR 25.

Następnie Autor wykorzystując wprowadzone wcześniej widmowe wskaźniki adaptacyjne C_A i C_B (por.[7]) oraz wartości R_w obliczone dla konstrukcji 11 i 12 (por. str. 99 i str. 113), formułuje dla odpowiednich klas instrumentów muzycznych jednoliczbowe kryteria izolacyjności akustycznej dla przegród w postaci nierówności odnoszących się do czterech wariantów użytkowania pomieszczeń (str. 129-130). Podobne kryteria dla oceny wskaźników izolacyjności akustycznej właściwej, przybliżonej zostały sformułowane dla dwóch wariantów użytkowania (str.130).

Dla przeprowadzonych oszacowań ważne jest wcześniejsze ustalenie Autora (por. str.57-58, wzory (6.1) i (6.2)) z którego wynika, że dla właściwej oceny wartości ważonych nie wystarcza znajomość widma uproszczonego lecz konieczny jest jego obraz po „filtracji” przez ścianę, który należy porównać ze standardem dźwięku NR 25. Próby wyznaczenia wartości ważonych $D_{min,w}$ i $R_{min,w}$ na podstawie zależności z rys.6.2a,b kończą się niedoszacowaniem z powodów wyjaśnionych na str. 58.

Kryteria izolacyjności akustycznej są własną oryginalną koncepcją Autora i finalnym efektem wszystkich analiz, przekonująco umotywowanym i łatwym w stosowaniu.

Uwagi krytyczne dyskusyjne

Nie mam w zasadzie żadnych krytycznych uwag merytorycznych dotyczących pracy, ponieważ Autor bardzo szczegółowo i wnikliwie przedstawił i przeanalizował wszystkie występujące w niej zagadnienia i wyciągnął z nich prawidłowe wnioski. Moje wątpliwości budzi tylko jedna kwestia związana z definicją uproszczonych widm instrumentów muzycznych.

Dla każdej z trzech grup instrumentów muzycznych zbiór wartości poziomu ciśnienia akustycznego aproksymowany jest w dwóch lub trzech przedziałach całego pasma częstotliwości przez funkcję przedziałami liniową (piecewise linear function) i nazywany jest widmem uproszczonym (str. 56, rys.6.1b)). Nie zostały podane warunki doboru parametrów określających taką funkcję, Autor ograniczył się do wyjaśnienia „*krzywe wygładzono prowadząc prostą linię pomiędzy maksimami widm*” (str. 56_{w1-4}). Jest to stwierdzenie niezrozumiałe, ponieważ termin wygładzanie kojarzy się zwykle z aproksymacją zachowującą także ciągłość pochodnych odpowiedniego rzędu. Oba przybliżenia (przedziałami liniowe) z rys. 6.1a i b różnią się tylko ilością przedziałów i usytuowaniem punktów przecięcia. Przyjęto bardzo prostą aproksymację bez żadnego oszacowania lub uzasadnienia.

Uwagi krytyczne redakcyjne

Lektura pracy pozwala dostrzec, że jej redakcja końcowa odbywała się w dużym pośpiechu i Autorowi zabrakło czasu na wykonanie ostatniego kroku jakim jest ostateczne przeczytanie edytowanego tekstu po pewnej zwłoce czasowej. Poniżej zestawilem kilka uwag.

Str. 29^{w2-3} zdanie „Zgodnie z prawem masy...”. Prawo masy jest wtórne, pierwotna jest własność logarytmu i oczywiście $20\lg 2 \approx 6$. Logarytmiczna postać prawa masy powoduje wzrost izolacyjności o 6 dB przy podwojeniu wartości funkcji logarytmowanej.

Str. 29 brak opisu oznaczenia c we wzorze (2.21) gdy prędkość fal giętych c_b zrównuje się z prędkością dźwięku w powietrzu c , $c_b = c$, wówczas częstotliwość f osiąga wartość graniczną f_c . Ponadto $B = Eh^3/[12(1-\nu^2)]$ nie ma charakteru dynamicznego jest stałą wartością określającą sztywność płyty na zginanie, E i ν oznaczają moduł Younga i współczynnik Poissona, h jest grubością płyty (przegrody)

W rozdziale 3.1 (str. 33) można tylko powołać się na normy [49], [43], bez cytowania fragmentów, nie są to zagadnienia istotne dla rozważań w pracy i są ogólnie dostępne. Najważniejsze stwierdzenie sprowadza się do konkluzji, że nie ma obecnie wyraźnych wymagań dla sal do ćwiczeń muzycznych. Krótki komentarz do trudno dostępnej normy brytyjskiej jest natomiast celowy.

Str. 38^{wiersz 4-12}, oraz wzór (4.2) który definiuje $B_{lmn} = \dots$, B_{lm} jest składnikiem niezacytowanego podstawowego wzoru określającego ciśnienie i ma tylko dwa indeksy, indeks l jest zbędny. Trzy indeksy we wzorze podstawowym mają składniki związane z funkcjami i częstotliwościami własnymi. Niezdefiniowany składnik $f(y,z)$ charakteryzuje rozkład prędkości drgającej ścianki $f(y,z) = v(y,z)$.

Podrozdziały 2.2 i 4.1 zawierające śladowe elementy podstaw teoretycznych zagadnienia i sprowadzają się głównie do zacytowania wzorów. Można je zredagować bardziej atrakcyjnie, dodając 2-3 rysunki, które wyjaśnią więcej niż cytowanie końcowych wzorów i tekst.

Str. 128, rys. 6.45., brak oznaczeń a) i b)

Str. 131, Tab. 6.35., opis konstrukcji 3, wartości wskaźników transmisji bezpośredniej uzyskane drogą symulacyjną dla ściany 3 wykazują znaczne odstępstwa zarówno od analogicznych wartości w pozostałych wszystkich przypadkach jak też od wartości uzyskanych z pomiarów terenowych dla tej ściany z uwzględnieniem przenoszenia bocznego. Sytuacja wymaga szczegółowego wyjaśnienia lub eliminacji tego przypadku.

Str. 132, Tab. 6.35. cd, opis konstrukcji 12, zamiast wskaźników NR: **22/26, 22/18, 16/23**, zgodnie z wcześniejszymi rysunkami powinno być **22/26, 24/18, 16/23**,

Rys 6.34-6.45 jednobarwne oznaczenia identyfikacji widm na tych rysunkach są w **sprzeczności** z wcześniejszą identyfikacją wprowadzoną na rys.6.1a i rys.6.1b.

Praca zawiera liczne powtórzenia tekstu Część uwag i wniosków w podrozdziałach jest powtarzana np. warunki z 6.8.5 str. 129^{w4-6} i str. 130^{w1-3} i w1-3 są powtórzone w 6.8.6 str. 136^{w4-8} i w1-4 w bezpośredniej

Podobnych uwag można przytoczyć więcej. **Wszystkie uwagi formalne mogą być jednak pominięte przy ocenie pracy, gdyż nie mają one żadnego istotnego merytorycznego znaczenia, a tym samym nie zmieniają mojej wysokiej oceny pracy.**

Wniosek końcowy

W recenzowanej rozprawie Autor uzyskał szereg nowych i interesujących rezultatów o dużym znaczeniu aplikacyjnym. Do najważniejszych z nich w mojej opinii należy zaliczyć:

- 1) Pomiar widm instrumentów muzycznych wraz z podziałem na trzy charakterystyczne, reprezentatywne grupy i aproksymowanie ich widmami uproszczonymi łatwiejszymi do zastosowania w wykonywanych analizach.
- 2) **Obliczenie lub pomierzenie, a następnie przedstawienie w formie wykresów, widm poziomego dźwięku w pomieszczeniu odbiorczym po jego transmisji przez przegrodę oraz dokonanie porównania ze wskaźnikami NR dla prezentowanych w pracy 11-tu przypadków ścian.**
- 3) **Sformułowanie warunków jakie powinny spełniać minimalne wskaźniki oceny izolacyjności akustycznej właściwej przegród między pomieszczeniami.**

Uzyskanie powyższych rezultatów możliwe było po uzyskaniu wyników z przeprowadzonych wcześniej żmudnych i szczegółowych procedur, których znaczenie zasługuje także na odnotowanie w tym miejscu, są to:

- 1) Pomiary izolacyjności akustycznej ścian w warunkach terenowych i laboratoryjnych
- 2) Symulacje obliczeniowe izolacyjności ścian istniejących i projektowanych

Autor skorzystał z bardzo dobrego wyposażenia laboratorium LIA UZ oraz wykazał się wysokimi umiejętnościami, wiedzą i biegłością, przeprowadzając zarówno trudne i złożone badania doświadczalne: terenowe i laboratoryjne przy użyciu nowoczesnej aparatury i technik pomiarowych, jak też skomplikowane symulacje numeryczne z wykorzystaniem profesjonalnych programów komputerowych.

W połączeniu z bardzo dobrym przygotowaniem teoretycznym w zakresie akustyki fizycznej Doktorant mógł przygotować rozprawę łączącą wszystkie aspekty konieczne dla rozwiązania omawianego zagadnienia i przeprowadzić kompleksowe badania ukierunkowane na ich praktyczne wykorzystanie w akustyce budowlanej.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgra Jarosława Gila w pełni spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. nr 65 z 2003 r., poz. 595 z późniejszymi zmianami). W związku z tym wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Łódź, 27 kwietnia 2015r.

