

prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki
emerytowany pracownik
Politechniki Wrocławskiej
ul. Olsztyńska 36
51-423 Wrocław
tel. 609 226 789
e-mail: andrzej.dobrucki@pwr.edu.pl

WPŁYNEŁO
2023 -10- 25
dn.....

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja JASIŃSKIEGO
pt. „Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych
odpowiedzi impulsowych”

Podstawą wykonania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 26 czerwca 2023. Tematyka rozprawy doktorskiej mieści się w zakresie tematycznym ww. dyscypliny. Praca została wykonana w Zakładzie Elektroakustyki Politechniki Warszawskiej. Promotorem rozprawy był prof. dr hab. inż. Jan Żera.

Rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Jasińskiego liczy 93 strony. Jest ona podzielona na 9 rozdziałów, ponadto zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz bibliografii oraz 3 dodatki. W rozprawie znajdują się 34 rysunki w tekście głównym oraz 4 w dodatku Z2 oraz 8 tabel, z czego 5 w tekście głównym oraz 3 w dodatku Z3. W bibliografii Autor umieścił 112 pozycji, wśród których znajdują się 2 pozycje Autora rozprawy, napisane wspólnie z Promotorem.

Celem pracy było zbadanie możliwości zastąpienia klasycznych pomiarów parametrów akustycznych pomieszczeń przeprowadzaniu przy użyciu wszechkierunkowych mikrofonów pomiarowych pomiarami z użyciem mikrofonów ambisonicznych. Ambisonia stanowi raczej technikę nagrywania dźwięku, tak aby można było odtworzyć jego właściwości przestrzenne i raczej rzadko jest stosowana do pomiarów. Z tego powodu należy uznać pomysł Autora jako świeży i niosący znaczny potencjał naukowy i praktyczny. Technikom ambisonicznym poświęca się ostatnio dużo miejsca w literaturze. Ja sam w ubiegłym roku recenzowałem pracę doktorską, w której Autorka wykorzystywała ambisonię do badań subiektywnego spostrzegania przemieszczania źródeł dźwięku. Cel recenzowanej pracy oraz jej zakres został sformułowany we wstępie, który stanowi Rozdział 1 rozprawy. Mierzone parametry akustyczne pomieszczeń można z grubsza podzielić na dwie grupy. Pierwszą z nich stanowią klasyczne parametry pogłosowe, takie jak czasy pogłosu T60 i T30, wczesny czas pogłosu EDT, czytelność i przejrzystość dźwięku C50 i C80, czas środkowy echemu T_s i inne, które wyznacza się w danym punkcie pomieszczenia z użyciem jednego dookólnego mikrofonu pomiarowego. Drugą grupę stanowią parametry przestrzenne, z których najważniejsza jest międzyuszna korelacja skrośna IACC, na podstawie której można wyznaczyć cały zestaw parametrów przestrzennych. Do wyznaczenia IACC potrzebny jest pomiar przestrzennej odpowiedzi impulsowej SRIR oraz transmitancji odniesionej do głowy HRTF (lub jej odpowiednika w dziedzinie czasu HRIR). Przestrzenną odpowiedź impulsową SRIR uzyskuje się w sposób podobny jak zwykłą odpowiedź impulsową, tyle że poprzez rejestrację we wszystkich kanałach mikrofonu ambisonicznego. Na podstawie SRIR oraz HRTF można wyznaczyć binauralną odpowiedź impulsową BRIR. Do wyznaczenia HRTF metodą

klasyczną, oprócz pary mikrofonów pomiarowych używa się sztucznej głowy lub manekina głowy i torsu, charakteryzujących wpływ obecności słuchacza na pole akustyczne w pomieszczeniu.

W rozdziale 2 Autor omawia parametry akustyczne pomieszczeń przedstawione pokrótce w rozdziale 1 oraz metody ich pomiaru. Opisuje parametry, które można wyznaczyć za pomocą IACC. Ważną częścią tego rozdziału jest przedstawienie progów zauważalności różnic poszczególnych parametrów. Będzie to miało znaczenie w dalszej części pracy. Bardzo skrótowo przedstawione są metody pomiaru odpowiedzi impulsowej pomieszczenia z użyciem tonu przestrajanego oraz metody korelacyjnej MLS. Generalnie, rozdział ten został opracowany na podstawie literatury.

W kolejnym 3 rozdziale opisane są techniki przetwarzania sygnałów ambisonicznych. Zdefiniowano pojęcie ambisonii i opisano sposób rozkładu sygnału przestrzennego na harmoniki sferyczne. Opisano mikrofony ambisoniczne jako szczególny rodzaj matryc mikrofonowych. Zdefiniowano wreszcie rząd i stopień harmonik sferycznych. Opisano sposób przetwarzania sygnałów uzyskanych z poszczególnych mikrofonów matrycy sygnału (tzw. format A) na harmoniki sferyczne (format B). Teoretycznie, rozkład sygnału przestrzennego na harmoniki sferyczne jest wariantem rozkładu na szereg Fouriera, przy czym jako bazę ortogonalną stosuje się wielomiany Legendre'a i stowarzyszone funkcje Legendre'a. Szereg ten jest zwykle nieskończony, tzn. rząd harmonik sferycznych zmienia się od 0 do nieskończoności. Ze względów praktycznych (np. wymiary matrycy mikrofonowej) rząd ten jest ograniczony, najczęściej do wartości 1 lub 3. Do swoich badań Autor użył matryc 1 rzędu Sennheiser Ambeo oraz matryc 3 rzędu Zylia. Autor omawia też zjawisko aliasingu przestrzennego, które ogranicza pasmo przetwarzanych częstotliwości. Rozdział 3 jest opracowany w całości również na podstawie doniesień literaturowych.

W rozdziale 4 przedstawione są zagadnienia związane z wyznaczaniem HRTF, czyli funkcji przeniesienia głowy, Trzeba podkreślić, że jest to wielkość indywidualna dla każdego osobnika. Stosowanie HRTF np. do słuchowej lokalizacji źródeł dźwięku lub do wyznaczania spostrzegania minimalnych przemieszczeń źródła dźwięku jest znacznie dokładniejsze, jeśli zastosuje się indywidualną HRTF danej osoby. W przypadkach nie wymagających takiej dokładności, można użyć HRTF z którejś bazy danych. Celem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Jasińskiego jest wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń. Z tego względu pomiary muszą być powtarzalne i niezależne od cech indywidualnych. Do wyznaczenia parametru przestrzennego IACC stosuje się więc HRTF znormalizowanego manekina symulującego głowę i tors (np. HATS produkcji firmy B&K) lub sztucznej głowy (w rozprawie użyto sztucznej głowy KU-100 firmy Neumann. Autor w swoich badaniach używał obu tych symulatorów. W literaturze stwierdzono, że funkcje HRTF rozłożone na harmoniki sferyczne niosą istotną informację, aż do 30 rzędu, matryca mikrofonowa zawierałaby wtedy 961 mikrofonów. Jeśli się więc używa mikrofonów ambisonicznych pierwszego lub trzeciego rzędu, powstają znaczne zniekształcenia sygnału. Autor omawia 4 metody minimalizacji tych zniekształceń i związanych z nimi błędów. Metody te występują w literaturze przedmiotu. W dalszym ciągu pracy doktorskiej Autor przetestował wszystkie te metody pod kątem zastosowania do wyznaczania parametrów akustycznych pomieszczeń. Rozdział 4 też został opracowany na podstawie literatury.

Rozdział 5 stanowi przegląd literatury. Uwzględniono w nim cytowane pozycje związane z tematyką pracy. Przegląd podzielono na trzy części: literatura dotycząca wyznaczania parametrów pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi

impulsowych, literatura dotycząca wyznaczenia kierunku dochodzenia dźwięku z udziałem rozkładu sygnałów na harmoniki sferyczne oraz literatura dotycząca zagadnień binauralizacji.

Od rozdziału 6 zaczyna się zasadnicza część rozprawy, obejmująca badania własne Autora. W rozdziale 6 sformułowano cel, tezę i zakres pracy. Wprawdzie cel i zakres pracy były przedstawiony wcześniej, głównie we Wstępie, to tu nastąpiło ściśle ich zdefiniowanie. Sformułowana teza rozprawy jest następująca:

„Możliwe jest uzyskanie zestawu parametrów akustycznych pomieszczenia, ze szczególnym uwzględnieniem binauralnych parametrów przestrzennych, za pomocą jednego przetwornika pomiarowego w postaci sferycznej matrycy mikrofonowej o kontrolowanej kierunkowości przy uwzględnieniu niezależnie mierzonych lub modelowanych funkcji HRTF.” Teza jest sformułowana prawidłowo, wskazuje jakie istotne zagadnienie badawcze obejmuje rozprawa i jaki jest jej ostateczny wynik.

W rozdziale 7 opisano metodykę badań, mierzone wielkości i sposób ich pomiaru, a także użytą aparaturę. W szczególności wskazano, że do badań użyto mikrofonów ambisonicznych: mikrofonu rzędu pierwszego Ambeo firmy Sennheiser oraz rzędu trzeciego firmy Zylia. Ponieważ, jak już podano wcześniej, są to mikrofony niskich rzędów, do prawidłowej binauralizacji sygnałów konieczna jest kompensacja błędów. Przetestowano cztery algorytmy:

- Least Squares (LS),
- Magnitude Least Squares (MagLS),
- Time Alignment (TA),
- Spatial Resampling (SPR)

Następnie opisano sposoby wyznaczenia funkcji HRTF. Do badań użyto manekina firmy Brüel&Kjaer oraz sztucznej głowy KU-100 firmy Neumann. Dla manekina funkcje HRTF wyznaczono numerycznie poprzez jej precyzyjne zeskanowanie i triangulację. Dla sztucznej głowy funkcję HRTF pobrano z bazy SADIE-II. Zbadano dwa warianty: z gęstą siatką obejmującą 8802 punkty, oraz siatkę rzadszą zawierającą 1550 punktów. Siatki o tych gęstościach zastosowano też do obliczeń HRTF manekina B&K. Przedstawiono badane pomieszczenia. Były to:

- Komora bezechowa Zakładu Elektroakustyki PW,
- Korytarz Gmachu Elektroniki PW,
- Studio dźwiękowe Zakładu Elektroakustyki,
- Sala koncertowa Filharmonii Pomorskiej w Bydgoszczy,
- Komora pogłosowa Instytutu Techniki Budowlanej.

Jak widać badane pomieszczenia charakteryzowały się skrajnymi właściwościami akustycznymi, dostosowanymi do ich funkcji użytkowych.

Podano, też, z jakiej aparatury pomiarowej korzystano. Oprócz wskazanych powyżej mikrofonów ambisonicznych, manekina i sztucznej głowy stosowano też wszechkierunkowe mikrofony pomiarowe, wszechkierunkowe źródło dźwięku B&K, odpowiednie interfejsy i oprogramowanie.

Zasadniczym rozdziałem rozprawy jest rozdział 8, przedstawiający wyniki badań. Jest to również rozdział najdłuższy, obejmujący ok 30% rozprawy. W pierwszej części tego rozdziału Doktorant przedstawia metodę obserwacji echogramów kierunkowych. Na trójwymiarowym wykresie przedstawione są amplitudy poszczególnych odbić i kierunki ich

dochodzenia. Aby określić czasy dojścia, należy przedstawiać echogramy wykreślane w odpowiednich przedziałach czasu. Jest to sposób bardzo obrazowy, ale niewygodny do analizy, przez co ten sposób nie był w dalszym ciągu pracy wykorzystywany. W kolejnym podrozdziale przedstawiony jest sposób wykreślenia echogramów w funkcji czasu dojścia poszczególnych odbić dla poszczególnych analizowanych pomieszczeń. Jako echogramy referencyjne do dalszych analiz przyjęto echogramy uzyskane za pomocą mikrofonu pomiarowego. Porównuje się je z echogramami uzyskanymi za pomocą kanału W (wszechkierunkowego) mikrofonów ambisonicznych. Wyniki uzyskane za pomocą mikrofonów ambisonicznych są podobne do wyników referencyjnych, chociaż występują pewne różnice. Autor ogranicza się do stwierdzenia faktu i rodzaju tych różnic, bez wnikania w ich przyczyny. Wyniki są takie, jakich należałoby się spodziewać. Dla komory bezechowej zmniejszanie się amplitudy echogramów w czasie następuje bardzo szybko, dla komory pogłosowej zaś – bardzo wolno. Ciekawe są wyniki dla dużej sali koncertowej. Wyraźnie widać moment dotarcia do mikrofonu pierwszego odbicia. W podrozdziale 3 przedstawione są wyniki obliczeń pogłosowych parametrów akustycznych, takich jak czas pogłosu T_{30} , czas wczesnego zaniku EDT, czytelność dźwięku C50, przejrzystość C80 i czas środkowy T_s . Parametry te obliczono dla wszystkich badanych pomieszczeń i z użyciem mikrofonu pomiarowego i kanałów W obu mikrofonów ambisonicznych: Ambeo i Zylia. Różnice wyników rzadko przekraczają wartości JND (just noticeable difference) – ledwie zauważalnych różnic. Największe różnice występują dla komory bezechowej. Jest to związane z dużym błędem określania czasów zaniku, które są bardzo małe. Narzuca się tu wniosek, że określanie parametrów pogłosowych pomieszczeń daje zgodne wyniki dla mikrofonów ambisonicznych i standardowych mikrofonów pomiarowych, w związku z czym, jeśli ograniczamy się do pomiaru tych parametrów nie ma potrzeby stosowania mikrofonów ambisonicznych.

W kolejnym podrozdziale rozdziału 8 przedstawiono wyniki pomiaru międzyusznej korelacji skróśnej IACC. Jest to wg mnie zasadniczy punkt rozprawy, ponieważ IACC jest parametrem przestrzennym, wymagającym oprócz pary mikrofonów (w metodzie standardowej) również manekina lub sztucznej głowy. Wyniki mogą mocno zależeć od wybranej metody pomiarowej. Wynik badania referencyjnego przedstawione są na rys 8.20. Z wyjątkiem komory bezechowej, dla której w całym paśmie częstotliwości wartość IACC wynosi prawie 1, wartości IACC pomieszczeń mają podobny przebieg. Dla małych częstotliwości, $f \leq 250$ Hz, wartość IACC jest duża bądź bardzo duża. Dla większych częstotliwości szybko ona spada. Nie ma specjalnie dużych różnic między wynikami dla manekina i dla sztucznej głowy. Niska wartość IACC skorelowana jest ze spostrzeganiem przestrzenności dźwięku i określaniem kierunku. Zdecydowanie większe różnice występują przy określaniu parametru IACC sal z użyciem mikrofonów ambisonicznych w porównaniu do wartości IACC uzyskanych za pomocą mikrofonów pomiarowych. Przetestowano też wyniki z użyciem opisanych wyżej metod binauralizacji do tworzenia uproszczonych przebiegów HRTF. Występują też duże różnice między wynikami uzyskanymi dla różnych wartości rozdzielczości siatki – małej 1550 punktów i dużej 8802 punkty. Wyniki różnią się też dla mikrofonów ambisonicznych 1 rzędu (Sennheiser Ambeo) i 3 rzędu (Zylia). Największe różnice występują dla częstotliwości małych i średnich, ale dla niektórych przypadków również dla dużych częstotliwości są znaczne różnice. Analizę niepewności pomiaru i wpływu na nią wielu czynników przedstawiono w podrozdziale 8.4. Największą rolę w bilansie niepewności odgrywa kierunkowość źródła. Autor obliczył niepewności pomiarowe macryc ambisonicznych składających się z 4 i 19 mikrofonów (odpowiednio rząd 1 i 3). Obliczenia

wykończono dla dwóch przypadków: założonej niepewności pojedynczego mikrofonu równej odpowiednio 0,6 dB i 1,1 dB. Te niepewności dotyczą matryc składających się z mikrofonów pomiarowych oraz matryc składających się z mniej dokładnych mikrofonów. Jak należało się spodziewać, niepewność rośnie wraz ze wzrostem niepewności pojedynczego mikrofonu oraz ze wzrostem liczby mikrofonów.

W rozdziale 9 rozprawy, doktorant przeprowadził dyskusję wykładową. Jest ona o tyle ważna, że w rozdziale 8 ograniczono się do wskazania różnic występujących między wynikami uzyskanymi w różnych warunkach, natomiast raczej mało jest wyjaśnień, skąd te różnice się biorą. W rozdziale 9 Autor podjął próbę wyjaśnienia przyczyn różnic. Podjęcie tematu użycia mikrofonów ambisonicznych, a konkretnie kanału W tych mikrofonów, do pomiaru parametrów pogłosowych pomieszczenia, wzięło się stąd, że w literaturze w zasadzie problem ten nie jest poruszany. Uzyskano dobrą zgodność między wynikami uzyskanymi za pomocą mikrofonów ambisonicznych a wynikami pomiaru uzyskanymi metodą klasyczną z użyciem mikrofonu pomiarowego. Nie jest to dla mnie niespodzianką, ponieważ kanał W mikrofonów ambisonicznych jest właściwie mikrofonem o dookólnej charakterystyce kierunkowości. Autor potwierdził tylko intuicyjne przypuszczenie.

Większe znaczenie ma porównanie wyników parametru IACC, charakteryzującego właściwości przestrzenne dźwięku w pomieszczeniu, uzyskane za pomocą mikrofonów ambisonicznych z wynikami uzyskanymi za pomocą mikrofonów pomiarowych i manekina akustycznego lub sztucznej głowy. Tutaj użycie mikrofonu ambisonicznego jest celowe o tyle, że używa się rzeczywiście przestrzennych rozkładów na harmoniki sferyczne. Zastosowanie mikrofonów ambisonicznych wymagało zbadania wpływu rozdzielczości określania HRTF a także metody upraszczania określania HRTF z użyciem niskich rzędów ambisonii. To zbadanie jest niewątpliwym osiągnięciem Autora rozprawy. Niestety, w większości przypadków różnice IACC określonych metodą standardową oraz metodami z użyciem ambisonii różnią się dosyć znacznie. Różnice wystąpiły dla wszystkich badanych pomieszczeń. Autor podkreśla, że różnice te nie występowały w całym paśmie częstotliwości, ale dla pojedynczych częstotliwości. Jednakże nie ma jakiejś systematyki wpływu sali, wpływu metody określania BRIR oraz częstotliwości na wynik pomiarów. Różnice te są większe dla mikrofonu Zylia ZM1-3E niż dla mikrofonu Ambeo. Autor porównał wyniki uzyskane w rozprawie z wynikami literaturowymi. Odnosi się wrażenie, że rozprawa jest kolejną pracą, na podstawie której nie da się określić jednoznacznie przydatności ambisonii do określania parametru IACC. We wnioskach z rozprawy (rozdział 10), Doktorant pisze, że różnice określania BRIR na podstawie zastosowania mikrofonów ambisonicznych są najmniejsze w przypadkach:

- zastosowania mikrofonu 1 rzędu Sennheiser Ambeo, przy uproszczeniu rzędu HRTF o rozdzielczości 8802 punktów metodami Magnitude Least Squares (MagLS) lub Spatial Resampling (SPR),

- zastosowania mikrofonu 3 rzędu Zylia ZM1-3E, przy uproszczeniu rzędu HRTF o rozdzielczości 1550 punktów metodą Spatial Resampling (SPR).

Rzeczywiście są one najmniejsze, ale jednak ciągle duże, co stawia znak zapytania nad metrologicznymi właściwościami przeprowadzenia pomiarów za pomocą mikrofonów ambisonicznych.

W dalszym ciągu Autor deklaruje udowodnienie postawionej w rozdziale 6 tezy.

Jak zaletę metody ambisonicznej Autor wskazuje, że pomiar można przeprowadzić za pomocą jednego urządzenia – mikrofonu ambisonicznego, w miejsce pomiaru parametrów pogłosowych za pomocą mikrofonu pomiarowego, a parametrów przestrzennych – za

pomocą sztucznej głowy lub manekina akustycznego. Należy jednak zastrzec się, że zastosowanie mikrofonu ambisonicznego w tym drugim przypadku jest dość kłopotliwe, ponieważ należy wybrać odpowiednią metodę kompensacji błędów określania HRTF i określoną rozdzielczość siatki, co nie jest jednakowe dla wszystkich pomiarów i chyba na obecnym etapie nie da się jednoznacznie określić. Tak więc deklarację udowodnienia tezy należy opatrzyć powyższymi zastrzeżeniami. Zaletą rozprawy jest jednak zbadanie możliwości i sformułowanie tych zastrzeżeń. Zostały one zresztą sformułowane przez Autora na ostatniej stronie zasadniczego tekstu, rozprawy.

Struktura pracy jest dosyć oryginalna. Pierwsze rozdziały poświęcone są opisom zagadnień związanych z tematyką rozprawy, ale jednak wtórnych. Część „autorska” rozprawy pojawia się dopiero w rozdziale 6, na str. 3. Biorąc pod uwagę, że cała praca (bez wykazu literatury i dodatków liczy 79 stron, część dotycząca rozważań nad stanem wiedzy stanowi prawie połowę pracy. Niektóre zagadnień poruszanych w części I pracy, np.: metody binauralizacji sygnałów ambisonicznych oceniane pod kątem wyznaczania parametrów akustycznych pomieszczenia są niezbędne i wykorzystywane w dalszym ciągu pracy. Wydaje mi się jednak, że ta część I mogłaby zostać skrócona. Rozprawa doktorska jest pracą naukową, przeznaczoną dla osób zorientowanych w temacie i nie musi szczegółowo wyjaśniać wszystkich zagadnień.

Rozprawa jest zredagowana dość niestarannie. Występują w niej dość liczne literówki, których tu nie będę wymieniał. Tak samo, styl rozprawy nie jest najlepszy. Autor jest niekonsekwentny w używaniu apostrofu przy odmianie nazwisk obcych. Reguła jest taka, że apostrofu używa się przy odmianie nazwisk kończących się literą „e” nieme, np. Laplace – Laplace’a, natomiast nie używa się w innych przypadkach: np. Fourier - Fouriera. Z tego względu odmiana „Gerzon’a (str. 16 i str. 30) jest błędna, natomiast „Gerzona” (też str. 30) – prawidłowa. Znalazłem też dwie pomyłki merytoryczne. Na str. 9 w ostatnim wierszu Autor pisze, że „określenie go (czasu pogłosu) jako spadek ciśnienia akustycznego milion razy, czyli o 60 dB”. Tymczasem 60 dB odpowiada spadkowi ciśnienia akustycznego (wartości skutecznej) tysiąc razy, natomiast milion razy spada wówczas natężenie dźwięku. Na str. 87 we wzorze (Z1.3) podana jest definicja IACF:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)p_R(t + \tau)dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)dt \int_{t_1}^{t_2} p_R(t)dt}}$$

W mianowniku pod pierwiastkiem brakuje tu kwadratów. Powinno być:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)p_R(t + \tau)dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t)dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t)dt}}$$

Autor stosuje tu na oznaczenie prawej strony litery „R” (right), natomiast w objaśnieniach do wzoru – literę „P” (prawy). Ta niekonsekwencja występuje również w innych miejscach.

Mimo zauważonych usterek uważam, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę. Autor podjął ciekawy temat o charakterze badawczym. W literaturze kwestia przeprowadzenia pomiarów parametrów akustycznych

pomieszczeń z użyciem ambisonii jest dyskutowana i nierozstrzygnięta. Rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Jasińskiego stanowi kolejny, ważny krok na drodze do rozstrzygnięcia postawionego celu: użycia pojedynczego mikrofonu (ambisonicznego) do wykonania pomiarów parametrów akustycznych - zarówno pogłosowych, jak i przestrzennych.

Z tego względu rozprawę doktorską mgr. inż. Macieja Jasińskiego pt. „Wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń z zastosowaniem przestrzennych odpowiedzi impulsowych” zaliczam do kategorii „spełniająca wymagania” wg skali ocen przedstawionej w zaleceniach dla recenzentów.

Andrzej Dobrucki

Wrocław, 19.10.2023

