

29.02.2024, Kraków

Prof. dr hab. Inż. Krzysztof Kluszczyński dr h.c.  
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki  
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej  
Katedra Inżynierii Elektrycznej

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Muszyńskiego pt. Modele i metody komputerowego generowania aranżacji muzycznych oraz badania ich podobieństwa**

### **1. Ogólne charakterystyka tematyki rozprawy doktorskiej na tle aktualnych trendów badawczych**

Tematyka pracy jest ciekawa i atrakcyjna - wiąże się z odwiecznym marzeniem człowieka o urządzeniach, zastępujących Go w realizacji czynności fizycznych (manualnych), jak też i czynności intelektualnych. Spełnieniem pierwszego marzenia były narodziny oraz dynamiczny rozwój robotyki, przypadający na drugą połowę XX wieku oraz pierwsze dekady XXI wieku. Czynności intelektualne są związane z procesami myślowymi (logicznym myśleniem i formułowaniem łańcuchów przyczynowo-skutkowych) oraz umiejętnościami, obejmującymi szybkie przetwarzanie dużej ilości informacji o zróżnicowanym charakterze, ekstrakcję cech wspólnych (uogólnienia) oraz szybki adaptację (przenoszenia doświadczeń). Szczególnie wyrafinowaną i zaawansowaną formą działalności intelektualnej jest proces tworzenia, związany z terminami: zdolności, talent, kreatywność, czy też natchnienie, ukierunkowany zazwyczaj na zaspakajanie potrzeb duchowych człowieka. Tą ludzką potrzebę obcowania z pięknem zaspakajają różne działy sztuki (muzyka, literatura, malarstwo, grafika, taniec, architektura itd). Gwałtowny w ostatnich czasach rozwój informatyki, nowych matematyki oraz powstanie techniki mikroprocesorowej i komputerowej obudziły ludzkie nadzieje na stworzenie sztucznej inteligencji (AI), zdolnej do podejmowania działalności twórczej o takim właśnie artystycznym charakterze. Ostatnim krzykiem mody w tym zakresie są narodziny Chat GPT.

Praca doktorska podejmuje temat, który fascynuje kompozytorów i naukowców od

kilkunastu lat, a dotyczy możliwości opracowania oprogramowania zdolnego do twórczego przetwarzania zadanych motywów muzycznych, a nawet komponowania oryginalnych utworów muzycznych. O wzroście zainteresowania tą tematyką świadczą powoływane do życia konferencje naukowe takie, jak przykładowo: International Society for Music Information Retrieval Conference, czy też International Conference on Computational Creativity, jak też coraz liczniejsze artykuły w czasopiśmie i monografiach naukowych, wydawane przez prestiżowe wydawnictwa, związane z powyższą tematyką.

Drugim nurtem badań naukowych, związanym z burzliwym rozwojem twórczości artystycznej i niespotykanymi wcześniej możliwościami rozpowszechnienia i popularyzowania efektów tej działalności w skali światowej, poprzez Internet, telewizję, radio, DVD, CD itd., jest zapobieganie plagiatom i naśladownictwom oraz zabezpieczanie praw autorskich twórców. Prawa autorskie wiążą się nie tylko z uznaniem i prestiżem, ale również z wymiernymi, nierzadko olbrzymimi, dochodami finansowymi. To wymaga zdefiniowania podobieństwa efektów działalności artystycznej i stworzenia narzędzi, pozwalających na pomiar stopnia tego podobieństwa.

Praca doktorska dotyczy obu powyżej wspomnianych zagadnień: automatycznego tworzenia utworów muzycznych oraz jednoznacznej i w miarę obiektywnej, bazującej na przesłankach matematycznych, oceny podobieństwa. Przy rozwiązywaniu obu tych zagadnień Doktorant bazuje na tej samej „graficznej reprezentacji utworu muzycznego” w postaci grafu, odzwierciedlającego rozkład nut i wzajemne powiązania pomiędzy nutami sąsiadującymi i odległymi w czasie. W kontekście powyższych rozważań temat pracy należy uznać za nowoczesny, aktualny i zgodny z trendami naukowymi w technice, ale również w sztuce i naukach prawnych.

## **2. Cele pracy doktorskiej i jej zakres tematyczny**

Cel pracy, a ściślej 3 główne cele pracy, zostały przedstawione na stronie 7 we „Wstępie” do pracy doktorskiej i obejmują:

- rozwinięcie grafowo - sieciowych modeli utworu muzycznego,
- opracowanie i formalne zdefiniowanie metod automatycznego generowania aranżacji muzycznych,
- opracowanie i formalne zdefiniowanie metod porównywania utworów muzycznych.

Są to cele sformułowane w sposób wyrazisty i przejrzysty. Pierwszy cel ma charakter celu pośredniego, albowiem jego osiągnięcie jest niezbędne do zrealizowania dwóch pozostałych celów.

Na kolejnej stronie 8 powyższe 3 główne cele zostały podzielone na ciąg 12 klarownie sformułowanych zadań badawczych, mających charakter syntetycznego zakresu pracy.

Z punktu widzenia formalnego, jak też względu na istotną wagę celów i zakresu pracy, zasadne byłoby wyodrębnienie tego fragmentu rozprawy ze „Wstępu” i umieszczenie go w osobnym rozdziale, zatytułowanym: „Cele i zakres pracy doktorskiej”.

Sądzę też, że dla lepszego skorelowania 3 głównych celów rozprawy z układem pracy doktorskiej i spisem treści, dobrze byłoby podzielić pracę na cztery części (a nie na trzy części) w taki sposób, aby pierwsze trzy części odpowiadały trzem celom pracy, a część czwarta zawierała wyniki badań.

Cele 1, 2 i 3, podobnie jak części pracy I, II, III, dobrze byłoby wówczas oznaczyć liczbami rzymskimi, korespondującymi z oznaczeniami części.

Z przekonaniem stwierdzam, że przedstawione przez Doktoranta 3 główne cele zostały w rozprawie osiągnięte, a zawartość merytoryczna pracy doktorskiej w pełni pokrywa się z przedstawionym zakresem pracy.

### **3. Charakterystyka merytorycznej zawartości pracy i osiągnięcia naukowe mgr inż. Szymona Muszyńskiego**

W rozdziale 2 Doktorant skupił swoją uwagę na zebraniu i omówieniu szeregu ciekawostek z historii muzyki, dotyczących możliwości generowania utworów muzycznych w sposób automatyczny, bądź półautomatyczny, z wykorzystaniem różnych procedur losowych. Istotą tych metod jest możliwość tworzenia nowych utworów na bazie źródłowego motywu muzycznego bez znajomości podstaw teoretycznych muzyki i metodologii komponowania poprzez odpowiednie losowe zestawianie fragmentów (taktów) motywu pierwotnego. Przytacza też interesujące przykłady utworów muzycznych, powstałych w XX i XXI wieku, których każdorazowe odtworzenie ma inny charakter ze względu na celowe włączenie przez kompozytora w partyturę kompozycji elementów przypadkowości, zapewniających niepowtarzalność kolejnych wykonań.

W rozdziale 3, zatytułowanym: „Omówienie aktualnego stanu badań” Doktorant dokonuje przeglądu możliwości wykorzystania w technice komponowania różnych metod matematycznych oraz metod sztucznej inteligencji (inteligencji maszynowej). Podejmowane przez różnych naukowców i kompozytorów próby są ukierunkowane na harmonizację melodii, dobór akompaniamentu, opracowywanie chóralnych aranżacji, ale również na generowania nowych dzieł, przy wykorzystaniu takich zaawansowanych metod matematycznych i informatycznych, jak: sieci

bayesowskie, sieci neuronowe, próbkowanie Gibbsa, teoria grafów itd.

Próby te mają jednak charakter badań wycinkowych i nie składają się na pełną, zamkniętą i wyczerpującą teorię.

Na tle tych rozważań Doktorant doprecyzowuje cele sformułowane na początku rozprawy. Jego zamiarem jest opracowanie na gruncie teorii grafów i sieci reprezentacji grafowo-sieciowej utworu muzycznego, która okaże się użyteczna w realizacji szerokiej gamy działań, związanych zarówno z generowaniem aranżacji muzycznych, jak też i z porównywaniem utworów muzycznych, a więc będzie miała charakter reprezentacji o szerokim i uniwersalnym znaczeniu. W odniesieniu do procedury porównywania utworów muzycznych, jego zamysłem jest sformułowanie miary podobieństwa kompozycji, wyrażonej przy pomocy jednej liczby, zawartej w przedziale  $[0,1]$ , co należy uznać za przedsięwzięcie w pełni oryginalne i nowatorskie.

Część I Doktorant zatytułował: „Grafowo-sieciowe modele utworów muzycznych” i rozpoczyna ją od przypomnienia podstawowych pojęć i terminów z zakresu teorii grafów. Na stronie 30 (wzorem 1.4)) definiuje 4-elementową reprezentację pojedynczej nuty, dalej - relację poprzedzania nut (wzór (1.5)) oraz w kolejnym kroku - relację bezpośredniego poprzedzania nut, odgrywającą istotną rolę w dalszych rozważaniach. Kluczowe znaczenie ma rozdział 2, w którym Autor przedstawia trzy różne sposoby odwzorowywania nut utworu muzycznego w wierzchołki grafu. Te trzy różne możliwe sposoby postępowania, związane z 3 różnymi algorytmami określającymi liczbę i właściwości wierzchołków grafu, to: reprezentacja prosta (opisana na stronie 39 przez tab. 1), reprezentacja zwykła (opisana na stronie 43 przez tab. 2) oraz reprezentacja pełna (opisana na stronie 46 wzorem (2.4)). Odmienny charakter powstałych grafów, różniących się ilością i zakresem przenoszonych informacji, przejrzycie ilustrują dwa odpowiednio dobrane przykłady. Pierwszy z nich to prosty, 5-nutowy motyw muzyczny, zaś drugi - początkowy fragment Toccaty i Fugi d-moll J. S. Bacha. Rosnącą złożoność reprezentacji wyraźnie widać na rysunkach 6 i 7, 8 i 9 oraz 10 i 11. Kolejny podrozdział 2.2 Doktorant poświęcił analizie możliwości obrazowania powiązań, występujących pomiędzy nutami, przy pomocy grafów, multigrafów oraz grafów ważonych (sieci). Wskazał na zalety i wady każdej z tych możliwości, ujawniające się przy zapisie krotności połączeń, etykietowaniu gałęzi i wierzchołków, inkrementacji etykiet, a również rozważył wpływ dokonanego wyboru na złożoność pamięciową algorytmów.

W Rozdziale 2.3 Doktorant podjął zagadnienie formalizacji procedury tworzenia gałęzi przy pomocy krawędzi, łuków i pętli w odniesieniu do grafów nieskierowanych i skierowanych z punktu widzenia relacji bezpośredniego poprzedzania. Omówieniu tego zagadnienia towarzyszą przykłady, przedstawione na rysunkach 12-14, wyjaśniające istotę powyższych odmiennych podejść.

Rozdział 3 dotyczy realizacji celu 2 czyli możliwości opracowania metody automatycznego generowania aranżacji muzycznych, bazującej na reprezentacji grafowo-sieciowej utworu muzycznego przy wykorzystaniu procesu stochastycznego spaceru losowego (random walk). Doktorant rozpoczyna rozważania od przedstawieniu 6 różnych propozycji wyznaczenia rozkładu początkowego (rozdział 3.2, wzory (3.2) - (3.7)), a następnie - 7 różnych propozycji wyznaczenia macierzy przejść (rozdział 3.3, (wzory 3.8 – 3.16)). W rozdziale 3.4 opisuje 4 różne możliwości zakończenia aranżacji: poprzez osiągnięcie zadanej liczby nut, wypełnienie zadanej liczby taktów, z-krotne osiągnięcie wybranego wierzchołka oraz osiągnięcie sztucznie dodanego wierzchołka tzw. ujścia.

Rozdział 5 odnosi się do generowania aranżacji przy wykorzystaniu niepełnych reprezentacji utworu muzycznego, a mianowicie reprezentacji prostej lub zwykłej, które to reprezentacje nie pozwalają na sporządzenie jednoznacznego zapisu nutowego na skutek braku informacji o nazwie (numerze oktawy) i długości nuty (w przypadku reprezentacji prostej) lub długości nuty (w przypadku reprezentacji zwykłej). Autor stwierdza, że wybór długości nuty i oktawy odbywa się w sposób losowy, ale przy wyborze oktawy istnieje możliwość narzucenia dodatkowych warunków lub też wykorzystania metody stosowanej w edytorach partytur, która polega na wyborze najbliższej oktawy.

Część II, zatytułowana: „Metody porównywania utworów”, wiąże się bezpośrednio z celem 3 (strona 7) i dotyczy opracowania metody porównywania utworów muzycznych, w której podobieństwo utworów będzie wyrażane poprzez pojedynczą liczbę, będącą miarą odległości utworów lub stopniem ich podobieństwa. Po uwagach wstępnych, zawartych w podrozdziałach 4.1 i 4.2, Doktorant przedstawia w podrozdziale 4.3 propozycję wprowadzenia pojęcia charakterystyki grafu jako wektora, którego kolejnymi współrzędnymi będą miary liczbowe najistotniejszych cech (właściwości) grafów, reprezentujących utwory muzyczne. Te cechy, w liczbie 10, Doktorant zestawia razem na stronach 83-85. Dalej stwierdza, że jest możliwe porównanie dwóch charakterystyk, odpowiadających dwom różnym grafom reprezentującym dwa różne utwory, metodą „współrzędna po współrzędnej” i przedstawia przykład takiego postępowania na stronie 88 w tab. 3. Przykład ten jednak dobitnie dowodzi, że rezultaty - w zależności od rozpatrywanej współrzędnej lub rozpatrywanego zbioru współrzędnych - prowadzą do różnych wyników. Stąd w rozdziale 4.4 przedstawia propozycję całościowej (kompleksowej) oceny podobieństwa poprzez wprowadzenie normy (wzór (4.3)), pozwalającej wyznaczyć odległość pomiędzy 2 punktami, których położenie w  $W$ -wymiarowej przestrzeni (gdzie:  $W$  odpowiada liczbie uwzględnianych współrzędnych) jest opisane przez 2 promienie wodzące (wektory), będące charakterystykami obu rozpatrywanych grafów. Wcześniej, pod koniec podrozdziału 4.3, zwraca uwagę na to, że każda



współrzędna wektora jest związana z innym przedziałem zmienności, co pociąga konieczność dokonania - przed ostatecznym wyznaczeniem odległości - normalizacji wartości poszczególnych współrzędnych wektorów w taki sposób, aby przedział zmienności każdej współrzędnej, mieścił się w przedziale [0,1] (strona 85). Normalizacja gwarantuje, że wyróżnione cechy, których miarą są wartości liczbowe współrzędnych, będą miały jednakowy (zrównoważony) wpływ na wartość odległości pomiędzy rozpatrywanymi utworami. W rozdziale 4.5 Doktorat proponuje, aby przy porównywaniu tworzonych aranżacji muzycznych, nie mierzyć ich odległości wzajemnej, ale mierzyć ich odległość od utworu oryginalnego (motywu źródłowego), stanowiącego naturalny „idealny” punkt odniesienia.

Rozdziały 5 i 6 mogą być traktowane jako dopełnienie i uzupełnienie wcześniejszych rozważań. Zaprezentowane zostały w nich dwa odmienne alternatywne podejścia do porównywania utworów muzycznych. Pierwsze z nich, opisane w rozdziale 5, bazuje na porównywaniu wzorców tekstowych i wykorzystaniu miary Hamminga oraz miary Levenshteina. Drugie, opisane w rozdziale 6, bazuje na strukturalno-ilościowym podobieństwie sieci i skupia się na badaniu cech macierzy sąsiedztwa oraz wartości funkcji wierzchołkowych i funkcji gałęziowych, zdefiniowanych na poszczególnych wierzchołkach i łukach sieci. Analizując ten problem, Doktorant korzysta z rezultatów prac naukowych swojego Promotora, odnoszących się do podobieństwa ilościowego wierzchołków oraz podobieństwa ilościowego gałęzi. Podejście to wymaga wykorzystania metod optymalizacji wielokryteriowej (wprowadzenia pojęcia kryteriów cząstkowych i metakryterium), bądź też zastosowania metody programowania celowego (podrozdział 6.2).

Na stronie 117 rozpoczyna się obszerna część III rozprawy doktorskiej, prezentująca wyniki badań (eksperymentów) przeprowadzonych na wybranych przykładach, która obejmuje aż 107 stron (od strony 117 do strony 224). Rozdział 7, pierwszy w części III, Doktorant poświęca różnym metodom generowania aranżacji muzycznych. Rozpoczyna od przedstawienia zbioru 11 zróżnicowanych melodycznie utworów, reprezentujących różne epoki i kierunki muzyczne oraz różne gatunki i formy muzyczne, poczynawszy od średniowiecznego chorału gregoriańskiego poprzez muzykę barokową i klasycyzmu, aż po muzykę współczesną oraz dodatkowo popularną muzykę ludową, muzykę filmową i muzykę rozrywkową (soul, jazz, hard rock i pop). W odniesieniu do 2 utworów uwzględnia 2 różne ścieżki dźwiękowe, wskutek czego liczba rozpatrywanych przypadków wzrasta do 13. Na tych 13 przykładach, stanowiących materiał źródłowy do tworzenia aranżacji muzycznych, przeprowadza szereg eksperymentów z wykorzystaniem formatów MIDI, MSCZ i XML, bibliotek jMusic i JUNG oraz programu MuseScore. Umiejętnie wybrał 3 warianty testowe (3 różne kombinacje), które oznaczył na stronie 119 jako warianty A,B,C. Wybrane warianty obejmują różne reprezentacje nut (prostą, zwykłą i pełną), różne struktury

grafów (unigraf, multigraf, sieć) oraz różne typy gałęzi (krawędzie, łuki, pętle). Konsekwencją dokonanego wyboru są mocno zróżnicowane charakterystyki grafów i reprezentacje grafowo-sieciowe o cechach, scharakteryzowanych liczbowo w tab. 4 oraz graficznie - na rysunkach 25-42. W przypadku złożonych kompozycji o rozbudowanej linii melodycznej i bogatym materiale dźwiękowym reprezentacje grafowo - sieciowe stają się zbyt gęste i przyjmują postać tak mocno zaczerwienionych (zaciemnionych) figur kołowych, że ich analiza wizualna (wzrokowa) staje się trudna lub wręcz niemożliwa. W przypadku takich kompozycji Doktorat proponuje użyć do rozmieszczania wierzchołków innych algorytmów, na przykład algorytmu KK (Kamady-Kawai) lub algorytmu EF(Fruchtermana- Reingolda). Ich użycie prowadzi do przestrzennego rozrzutu wierzchołków (uwidoczono to na rysunkach 27, 28, 36), co w sposób znaczący ułatwia analizę i interpretację graficzną. Szczegółowego i wyczerpującego porównania wszystkich zaproponowanych 13 przypadków utworów muzycznych Doktorant dokonuje w rozdziale 7.4. Wpierw w tab. 5 dokonuje zestawienia obok siebie wszystkich charakterystyk grafowo - sieciowych utworów, a następnie - po dokonaniu normalizacji współrzędnych - zestawia w tab. 6 znormalizowane charakterystyki grafowo - sieciowe. Dalej przechodzi do analizy graficznej różnych reprezentacji utworów. Bardzo bogaty materiał ilustracyjny, na który składają się rysunki 29 - 42, pozwala na wyciągnięcie wielu ciekawych wniosków, dotyczących formalnej budowy rozważanych kompozycji. Ponadto ujawnieniu ulegają różnorakie cechy utworów, trudne do wychwycenia uchem.

Szczególne znaczenie dla rozprawy doktorskiej ma rozdział 7.5, w którym Doktorant dokonał porównania aranżacji muzycznych, wygenerowanych z pomocą różnych wariantów spaceru losowego na bazie 2 utworów muzyki poważnej i 2 utworów muzyki rozrywkowej (a więc utworów, różniących się w sposób zasadniczy charakterem). Na rysunkach 43, 45, 46, 49, 50, 52, 53, 55 i 56 zilustrował ich reprezentacje grafów sieciowe, w tab 7-16 zawarł informacje liczbowe o ich charakterystykach, zaś na rysunkach 44, 48, 51 i 54 odtworzył zapis nutowy wybranych aranżacji. Materiał ten stał się podstawą do wyciągnięcia interesujących i użytecznych wniosków, dotyczących różnych metod generowania warjacji. Co istotne, Doktorant nie poprzestał na formalnej analizie matematycznej wygenerowanych utworów, lecz wziął również pod uwagę ich aspekty muzyczne.

Rozdział 8 to analiza metod porównywania utworów muzycznych, bazująca na strukturalno-ilościowej mierze podobieństwa. Autor dokonał porównania 21 kompozycji, reprezentujących muzykę klasyczną, filmową i rozrywkową (popularną) i omówił możliwości wykorzystania opracowanych metod do wykrywania plagiatów (rozdział 8.5).

Na stronach 225-231 Doktorant dokonał szerokiego i wyczerpującego podsumowania

osiągniętych wyników, związanych z realizacją 3 głównych celi pracy doktorskiej, przedstawionych na stronie 7. Wskazał na możliwość wykorzystania opracowanych metod w działalności kompozytorskiej i w kształceniu muzycznym, jak też na ich przydatność w analizie różnych zagadnień, związanych z prawami autorskimi oraz z wykrywaniem świadomych, bądź też nieświadomych plagiatów.

Cennym, użytecznym i ciekawym uzupełnieniem pracy doktorskiej są załączniki (liczące 52 strony), dotyczące: analizy złożoności obliczeniowej wykorzystywanych algorytmów (z przejrzystą interpretacją graficzną, przedstawioną na rysunkach A-1 - A-4) oraz badań ankietowych, ukierunkowanych na ocenę wartości artystycznej i walorów muzycznych wygenerowanych aranżacji. Przeprowadzenie badań ankietowych (prowadzonych w okresie od 8 października do 18 listopada 2023) należy uznać za bardziej ciekawy i wartościowy pomysł Doktoranta, mający ważne znaczenie dla oceny i interpretacji uzyskanych rezultatów od strony muzycznej.

#### **4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz sugestie, dotyczące kierunków dalszych prac**

W moim przekonaniu punktem wyjścia i podstawą do tworzenia reprezentacji grafowo-sieciowych powinien być zapis nutowy (notacja muzyczna linii melodycznej) - i to z zapisu nutowego powinny wynikać wszystkie przyjmowane definicje i terminy. W szczególności z zapisem nutowym powinna być związana reprezentacja pojedynczej nuty linii melodycznej jako ciągu 3 liczb porządkowych, z których pierwsza określa wysokość nuty i należy do przedziału  $[-57, +62]$ , druga - charakteryzuje długość nuty jako najkrótszej wartości rytmicznej, zaś trzecia - moment pojawienia się nuty w zapisie nutowym, również wyrażony w krotności najkrótszej wartości rytmicznej. Taka reprezentacja nuty związana byłaby bezpośrednio z tym, co stanowi istotę zapisu nutowego: dyskretyzacją czasu (czas w utworze muzycznym jest wielkością dyskretną i relatywną, zależną od wartości rytmicznej najkrótszej nuty oraz tempa utworu) oraz dyskretnym rozłożeniem częstotliwości nut, przynależnych do stroju równomiernie temperowanego i mieszczących się w paśmie częstotliwości słyszalnych przez ludzkie ucho. Reprezentacja, zaproponowana przez Doktoranta i opisana wzorem (1.4) jest nadmiarowa (redundantna), co wynika z tego, że czas trwania nuty jest podany w dwojaki sposób: w sekundach oraz w długości nuty, a ponadto reprezentacja ta „miesza” cechy nuty jako podstawowego elementu notacji muzycznej (wysokość nuty, długość nuty) z cechami dźwięku, odpowiadającego nucie, traktowanego jako zjawisko akustyczne (częstotliwość podstawowej harmonicznnej, czas trwania



dźwięku, chwila zaistnienia zjawiska), przez co z jednej strony odnosi się do zapisu nutowego melodii, a z drugiej strony - do ścieżki dźwiękowej tej melodii.

W kontekście wyżej przedstawionej propozycji uważam, że rozważania, dotyczące zagadnienia „od ścieżki dźwiękowej do reprezentacji grafowo - sieciowej” powinny być podzielone na dwa oddzielne problemy, a mianowicie: problem „konwersji ścieżki dźwiękowej w notację muzyczną (zapis nutowy)” oraz problem „wyznaczenia reprezentacji grafowo-sieciowej na podstawie notacji muzycznej (zapisu nutowego)”.

Przyjęcia założenia upraszczającego i odpowiedniego komentarza wymaga to, że Doktorant nie uwzględnia w notacji muzycznej znaków i oznaczeń graficznych, opisów słownych i oznaczeń literowych, związanych z tempem utworu, chwilowymi zmianami tempa, dynamiką utworu (głośnością nut, zmianami głośności nut w ramach fraz muzycznych, akcentami itp.) i z bardzo szerokim wachlarzem możliwych sposobów artykulacji dźwięków, rzutujących w istotny sposób na barwę dźwięków (zawartość wyższych harmonicznnych dźwięków tzw. alikwotów i ich odbiór przez ludzkie ucho). Wyżej wymienione cechy, mające decydujący wpływ na interpretację utworu, powodują, że ten sam utwór muzyczny wykonywany przez różnych artystów, a nieraz nawet przez tego samego artystę, ale w odmiennych warunkach i na innym instrumencie, brzmią zupełnie inaczej. Cechy te, nie uwzględniane w reprezentacjach grafowo-sieciowych mogą w znaczący sposób zacierać podobieństwo utworów, albo też eksponować ich cechy wspólne. Stąd też pominięcie ich wpływu na kształtowanie reprezentacji grafowo-sieciowej wymaga odpowiedniej dyskusji i komentarza. To, jak wielka jest ich waga w odbiorze dzieła przez słuchaczy i w ocenie walorów muzycznych utworu, pokazują konkursy muzyczne dla solistów, którzy wykonują na instrumencie ten sam utwór (realizują ten sam zapis nutowy), a o ocenie wykonania i kolejności zdobytych przez artystów miejsc, decydują cechy, które w reprezentacji grafowo - sieciowej nie są w ogóle uwzględniane.

Proponuję przyjęcie terminu „reprezentacja grafowo - sieciowa” utworu muzycznego i unikanie sformułowania: „model utworu”, czy też „odwzorowanie utworu”. Model powinien jak najlepiej odzwierciedlać rzeczywistość, a proponowane reprezentacje z samego założenia „gubią” wiele istotnych informacji, zawartych w zapisie nutowym notacji muzycznej i na ścieżce dźwiękowej.

Na stronie 30, wprowadzając oznaczenia dla różnych długości nut, Doktorant nie uwzględnia możliwości wystąpienia w utworze nut o wartościach rytmicznych niemetrycznych np. trójek, ósemek (o czasie trwania odpowiadających jednej ćwierćnucie).

Doktorant nie uwzględnia możliwości wystąpienia w materiale muzycznym tzw. ozdobników (przednutek, obiegników, tryli itp.).

Proponuję zastąpić nazwę „reprezentacja prosta” terminem „reprezentacja zredukowana”, która lepiej oddaje istotę dokonanej operacji, polegającej na zredukowanie wysokości dźwięków do jednej oktawy.

Konieczna jest korekta wartości liczby 1452, określającej wartość rozróżnianych indeksów wierzchołków (strona 146) ze względu na to, że wartość 121 odpowiada wszystkim pauzom i nie zależy od ich długości (strona 43). Powinno być:  $120 \cdot 12 + 1 = 1441$

Za termin niefortunny uznaję przyjęty termin „aranżacja Muzyczna” no określenie melodii stworzonej z zadanego materiału dźwiękowego na drodze operacji matematycznych. Proponuję aby mówić raczej o różnych „wariantach matematycznych”, „modyfikacjach matematycznych”, czy też „wersjach matematycznych” zadanego źródłowego motywu muzycznego, a warianty (wersje, modyfikacje), których podobieństwo do oryginału nie budzi wątpliwości i które wykazują odpowiednie walory muzyczne, określać mianem wariacji muzycznych.

Również niefortunne określenie to „manualna analiza” powiązań pomiędzy nutami oraz „manualna analiza” reprezentacji grafowo-sieciowych (strona 41, w. 11d, strona 49, w. 3g, w. 13g). Proponuję mówić o „analizie wizualnej” lub „analizie wzrokowej”.

## 5. Ocena układu i redakcji pracy doktorskiej

Praca doktorska jest bardzo obszerna. Obejmuje 304 strony, na które składa się część główna (252 strony) oraz załączniki A i B (52 strony). Załączniki dotyczą zagadnień istotnych z punktu widzenia celów pracy i ze względu na ich znaczenie, związane z użytkowaniem algorytmów oraz oceną rezultatów ich użycia od strony muzycznej, mogłyby być z powodzeniem włączone do części głównej i uznane za w pełni integralną i oryginalną część rozprawy.

Układ pracy, jej podział na rozdziały i podrozdziały jest logiczny i w pełni uzasadniony. Uwagę, sugerującą inny podział rozprawy doktorskiej na części, przedstawiłem w rozdziale 2 mojej recenzji.

Praca jest bardzo dobrze i przejrzysto zilustrowana. Pomocny jest, umieszczony na końcu części głównej, spis rysunków (numerowanych kolejno od 1 do 66) oraz spis tabel. W moim odczuciu korzystniejsze byłoby zastosowanie powszechnie stosowanego w książkach, monografiach i rozprawach systemu numeracji rysunków, powiązanego z numerami rozdziałów głównych.

Praca jest napisana ładnym językiem. Błędy językowe i gramatyczne są bardzo nieliczne np. strona 89, w.6,7d – jest: „jedno rozwiązanie dominuje wszystkie pozostałe rozwiązania”; powinno być:

„jedno z rozwiązań dominuje nad pozostałymi rozwiązaniami”; strona 119, w.2,3g – jest: „ścieżka muzyczna stanowiła monofonię”; powinno być: „ścieżka muzyczna miała charakter monofoniczny”. Stosowana terminologia techniczna i matematyczna są w pełni poprawne. Uwagi, dotyczące terminologii związanej z nazwami własnymi, wprowadzonymi przez Doktoranta, zamieściłem w rozdziale 4.

## **6. Charakterystyka bibliografii**

Bibliografia jest podzielona na 4 części: bibliografię podstawową (obejmującą 90 pozycji), bibliografię (pomocniczą złożoną z 23 pozycji), źródła sieciowe i bazy on-line (3 pozycje) oraz narzędzia informatyczne i ich dokumentacje (14 pozycji). Zbiór pozycji literaturowych jest obszerny, bardzo dobrze dobrany i ściśle koreluje z zawartością merytoryczną rozprawy (w części podstawowej rozprawy źródła są umieszczone w kolejności powołań). Zawiera najważniejsze pozycje monograficzne, książkowe, jak też artykuły z czasopism międzynarodowych i ogólnopolskich oraz liczne referaty z konferencji i seminariów, merytorycznie związanych z pracą doktorską. Ponadto uwzględnia prace doktorskie.

Tematyka tych publikacji obejmuje prace z zakresu informatyki, matematyki i sztucznej inteligencji (teoria grafów, hipergrafów i sieci, teoria macierzy, probabilistyka, statystyka, teoria sygnałów, bazy danych, uczenie maszynowe, sieci neuronowe, logika rozmyta, algorytmy genetyczne, optymalizacja wielokryterialna, badania operacyjne, programowanie dynamiczne itp.) oraz z zakresu teorii muzyki, ze szczególnym uwzględnieniem metod komputerowego i automatycznego generowania muzyki i analizy podobieństw z utworów muzycznych. Zwraca uwagę bardzo duża liczba najbardziej aktualnych publikacji z lat 2017 - 2023 (w bibliografii podstawowej jest to 57 pozycji, w tym 6 - z roku 2023). Dobór, zakres i aktualność pozycji literaturowych zasługują na uznanie.

## **7. Wniosek końcowy**

Sformułowane na stronie 7 cele pracy doktorskiej, zostały osiągnięte i potwierdzone realizacją szerokiego programu badań. Doktorant udowodnił, że dysponuje bardzo dobrym warsztatem badacza, obejmującym zarówno bogatą wiedzę z zakresu informatyki, teorii grafów, teorii macierzy i programowania wielokryterialnego, jak i umiejętnością posługiwania się szerokim wachlarzem środków informatycznych. Ponadto mgr inż. Szymon Muszyński udowodnił, że

dysponuje odpowiednią wiedzą muzyczną i znajomością teorii muzyki, bez czego realizacja pracy doktorskiej nie byłaby możliwa.

Stwierdzam, że w moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Szymona Muszyńskiego spełnia wszystkie wymagania zawarte w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 roku i wnioskuję do Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ponadto proszę o rozważenie mojego wniosku o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Muszyńskiego. Do wystąpienia z wnioskiem o wyróżnienie rozprawy skłaniają mnie następujące względy:

- Praca doktorska ma szeroki, interdyscyplinarny charakter i wychodzi poza ramy dziedziny nauk inżynieryjno - technicznych, obejmując dodatkowo wybrane zagadnienia zakresu teorii muzyki i matematyki.
- Tematyka pracy jest bardzo nowoczesna i aktualna, co potwierdza fakt, że w ostatnim okresie czasu były realizowane w zakresie tejże tematyki 4 prace doktorskie w znaczących ośrodkach naukowych na świecie: Universite Grenoble Alpes (Francja, 2020) Harvard, University (USA, Boston, 2019), Universidad de Malaga (Hiszpania, Malaga, 2021) oraz Sorbonne Universite (Francja, Paryż, 2023).
- Doktorant sformułował oryginalne cele pracy i osiągnął je przy wykorzystaniu szerokiego wachlarza środków matematycznych, informatycznych i audiowizualnych.
- Rozprawa doktorska poprzez swój obszerny i wyczerpujący zakres oraz spójność tematyczną przyjmuje postać monografii naukowej.
- Praca wyróżnia się bogatym materiałem ilustracyjnym, ładnym językiem oraz wysokim poziomem redakcyjnego opracowania
- Wykonanie pracy było bardzo pracochłonne i wymagało realizacji szerokiego programu badań oraz przeprowadzenia obszerny i szczegółowej analizy bardzo dużej liczby różnych przypadków.

Prof. dr hab. Inż. Krzysztof Kluszczyński dr h.c.

