

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

AUTOREFERAT

SYNTEZA DŹWIĘKU W REPRODUKЦИИ I WYKONAWSTWIE MUZYKI
(SOUND SYNTHESIS FOR MUSIC REPRODUCTION AND PERFORMANCE)

Autor:

DR MAREK PLUTA
EMAIL: PLUTA@AGH.EDU.PL

16 kwietnia 2019

Spis treści

1	Informacje podstawowe	3
1.1	Imię i nazwisko	3
1.2	Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	3
1.3	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	4
1.4	Doświadczenie zawodowe	4
2	Osiągnięcie stanowiące podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego	5
2.1	Waga i uzasadnienie podjęcia tematu	7
2.2	Cel i zakres opracowania	8
2.3	Przeprowadzone prace, badania i analizy	11
2.3.1	Metoda montażu frazy	11
2.3.2	Metoda nierealizowalnych instrumentów	16
2.4	Podsumowanie	18
3	Pozostałe osiągnięcia naukowo – badawcze	19
3.1	Okres przed uzyskaniem stopnia doktora	19
3.2	Okres po uzyskaniu stopnia doktora	20
4	Podsumowanie działalności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej	22
4.1	Działalność publikacyjna	22
4.2	Udział w projektach	23
4.3	Udział w konferencjach naukowych	23
4.4	Działalność recenzencka i redakcyjna	23
4.5	Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	24
4.6	Stáže naukowe	24
4.7	Działalność organizacyjna	24
4.8	Działalność dydaktyczna	25
4.9	Nagrody i wyróżnienia	25
4.10	Zbiorcze zestawienie dorobku naukowo-badawczego	26

1 Informacje podstawowe

1.1 Imię i nazwisko

Marek Janusz Pluta

1.2 Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- 10.2015 – 06.2016 Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Humanistyczny
Studium doskonalenia dydaktycznego
data i miejsce: 14.06.2016, Kraków
- 10.2004 – 09.2008 Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki,
uzyskany stopień: **doktor nauk technicznych**
dyscyplina: **mechanika**
specjalność: **inżynieria akustyczna**
tytuł rozprawy doktorskiej: *Badanie interakcji słuchacza ze sprzętowo-programowym systemem symulowania błędów intonacyjnych*
promotor: dr hab. inż. Piotr Kleczkowski, prof. nadzw. AGH
praca otrzymała **wyróżnienie**
data i miejsce: 26.06.2009, Kraków
- 10.1999 – 06.2004 Akademia Muzyczna w Krakowie,
Wydział Kompozycji, Dyrygentury i Teorii Muzyki,
uzyskany tytuł zawodowy: **magister sztuki**
kierunek: **dyrygentura**
tytuł pracy magisterskiej: *Komputerowe symulacje wybranych problemów występujących podczas pracy z orkiestrą, jako nowy element kształcenia słuchu dyrygentów*
dyplom **z wyróżnieniem**
data i miejsce: 4.11.2004, Kraków
koncert dyplomowy z orkiestrą Capella Cracoviensis w Filharmonii Krakowskiej w dniu 6.06.2004
- 10.1998 – 06.2004 Uniwersytet Jagielloński,
Instytut Fizyki,
uzyskany tytuł: **magister**
kierunek: **fizyka**
specjalność: **fizyka komputerowa**
tytuł pracy magisterskiej: *Komputerowy system rozpoznawania komend głosowych oparty na sieci neuronowej*
data i miejsce: 15.07.2004, Kraków
- 09.2003 – 10.2003 Międzynarodowa Akademia Bachowska
pod kierunkiem prof. Helmutha Rillinga
Kurs dyrygencki zakończony udziałem w prowadzeniu koncertów w Filharmonii Krakowskiej z wykonaniem Mszy h-moll J. S. Bacha
data i miejsce: 5.10.2003, Kraków

1.3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 10.2011 – obecnie Akademia Muzyczna w Krakowie,
Wydział Twórczości, Interpretacji i Edukacji Muzycznej,
– **adiunkt**
- 10.2010 – obecnie Akademia Górniczo Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki – **adiunkt**
- 10.2010 – 06.2011 Akademia Muzyczna w Krakowie,
Wydział Twórczości, Interpretacji i Edukacji Muzycznej,
– **adiunkt (3/4 etatu)**
- 10.2009 – 06.2010 Akademia Muzyczna w Krakowie,
Wydział Twórczości, Interpretacji i Edukacji Muzycznej,
– **adiunkt (1/2 etatu)**
- 10.2008 – 06.2009 Akademia Muzyczna w Krakowie,
Wydział Twórczości, Interpretacji i Edukacji Muzycznej,
– **asystent (1/2 etatu)**
- 10.2008 – 09.2010 Akademia Górniczo Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki – **asystent**
- 10.2004 – 06.2008 Akademia Muzyczna w Krakowie,
Wydział Twórczości, Interpretacji i Edukacji Muzycznej,
– **umowy o dzieło (prowadzenie wykładów)**
- 10.2004 – 09.2008 Akademia Górniczo Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki – **doktorant**

1.4 Doświadczenie zawodowe

- 01.2019 – obecnie Independent Digital sp. z o.o., ul. Dobra 28, 00-344 Warszawa –
ekspert merytoryczny ds. badań w zakresie badań nad przetwarzaniem dźwięku
- 10.2008 – 06.2009 Akademia Muzyczna w Krakowie – opracowanie i wdrożenie oprogramowania komputerowego dla celów internetowej oceny kadry dydaktycznej przez studentów Akademii Muzycznej w Krakowie
- 1999 – 2001 **Skrzypek** Radiowej Orkiestry Symfonicznej w Krakowie
- 1994 – 2000 **Skrzypek**, a od 1999 r. również drugi **dyrygent** orkiestry kameralnej Concerto Lamelli

2 Osiągnięcie stanowiące podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego

Osiągnięciem stanowiącym podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego wynikającego z art. 16. ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.) jest monografia habilitacyjna napisana w języku angielskim pod tytułem:

Sound Synthesis for Music Reproduction and Performance

Tytuł polski:

Synteza dźwięku w reprodukcji i wykonawstwie muzyki

Marek Pluta, 2019, *Sound Synthesis for Music Reproduction and Performance*, (*Synteza dźwięku w reprodukcji i wykonawstwie muzyki*), Wydawnictwa AGH, Kraków, 451 s., (Rozprawy Monografie / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; ISSN 0867-6631), Bibliogr. 399–443, ISBN 978-83-66016-69-9

Udział procentowy autora: 100%

Recenzje wydawnicze:

- prof. dr hab. inż. Jan Żera, Politechnika Warszawska,
- prof. dr hab. inż. Piotr Kleczkowski, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Indywidualnym osiągnięciem naukowym autora jest wkład w rozwój inżynierii dźwięku poprzez opracowanie dwóch nowych metod syntezy dźwięku, dedykowanych w głównej mierze zastosowaniom muzycznym. Przeznaczeniem pierwszej z nich, metody montażu frazy, jest reprodukcja materiału nutowego, rozumiana jako konwersja zapisu symbolicznego na postać dźwiękową. Proces ten może być traktowany jako symulacja dźwięku instrumentu muzycznego oraz – do pewnego stopnia – grającego na tym instrumencie wykonawcy. Druga metoda, synteza dźwięku nierealizowalnych instrumentów, jest skierowana do zastosowań scenicznych, przede wszystkim do gry na żywo, a także do celów eksperymentalnych. Stanowi oryginalne podejście do fizycznego modelowania instrumentów.

Synteza dźwięku metodą montażu frazy jest oparta na technikach samplingu i konkatencji, unika jednak szeregu wad każdej z nich. Pozwala osiągnąć wysoką wierność odwzorowania nie tylko pojedynczych dźwięków, ale przede wszystkim płynnie prowadzonej linii melodycznej instrumentu akustycznego, w której kolejne dźwięki łączone są bez nowych faz ataku, a przejścia między nimi niosą istotną informację. Cecha ta, niespotykana w konwencjonalnym samplingu, jest charakterystyczna dla metod konkatencyjnych. W porównaniu do tych drugich, metoda montażu frazy pozwala jednak pominąć część etapów przetwarzania sygnałów, upraszczając proces syntezy. Stało się to możliwe dzięki zastosowaniu odpowiednio zaprojektowanego korpusu.

Koncepcja drugiej z opracowanych metod, syntezy dźwięku nierealizowalnych instrumentów, jest oparta na wykorzystaniu technik modelowania fizycznego instrumentów muzycznych celem symulacji obiektów wytwarzających dźwięk, które w normalnych warunkach nie mogą zaistnieć. Pomimo występowania charakterystycznych różnic, obiekty takie

posiadają szereg cech wspólnych z rzeczywistymi obiektami fizycznymi. Cechy te dają użytkownikowi możliwość intuicyjnej kontroli modelu, podczas gdy różnice stają się fundamentem do wytworzenia dźwięków o całkowicie nowych właściwościach, będących wynikiem celowego łamania określonych reguł, którym podlegają fizyczne objekty.

Podstawowym obszarem zastosowania opracowanych metod syntezy są sztuki muzyczne oraz przemysł muzyczny. Metoda montażu frazy jest nastawiona w głównej mierze na automatyczne generowanie ścieżek dźwiękowych w oparciu o zapis nutowy. Można ją zatem wykorzystać w programach notacyjnych i sekwencerowych, jako element aranżacji utworu muzycznego zastępujący instrument akustyczny i grającego na nim instrumentalistę. W ten zakres wchodzi także zyskujące coraz większą popularność techniki automatycznej kompozycji, w których materiał nutowy wygenerowany przez algorytm musi zostać przetworzony na nagranie utworu. Techniki takie wiele zyskują dzięki zastosowaniu wysokiej jakości, realistycznych metod syntezy. Inaczej jest w przypadku metody nierealizowalnych instrumentów, która swoje główne walory ujawnia w połączeniu z żywym wykonawcą, potrafiącym wykorzystać możliwości precyzyjnej kontroli modelu. Wykonawca taki otrzymuje narzędzie do eksperymentów w zakresie nowych dźwięków, podczas gdy cechy modelu wspólne z istniejącymi instrumentami pozwalają mu, przy zastosowaniu odpowiednich kontrolerów, wykorzystać posiadane już umiejętności gry. W konsekwencji, na tego rodzaju syntezatorze możliwa jest gra wysoce ekspresyjna oraz stosowanie opanowanych wcześniej zaawansowanych technik wykonawczych.

Poza oczywistymi zastosowaniami artystycznymi i w przemyśle muzycznym, opracowane metody poszerzają wachlarz technik kontrolowanego wytwarzania sygnałów akustycznych. Tego typu narzędzia wykorzystywane są w badaniach percepcji dźwięku przez człowieka, gdy zachodzi potrzeba generowania powtarzalnych, lecz jednocześnie relatywnie złożonych sygnałów o precyzyjnie regulowanych właściwościach. Wypełniają one lukę pomiędzy generatorami prostych, abstrakcyjnych przebiegów, a nagraniami, które można kontrolować jedynie w ograniczonym zakresie. W dotychczasowej pracy naukowej autor zrealizował szereg prac badawczych w których materiał dźwiękowy został wygenerowany przez różnego rodzaju syntezatory. Po części, to właśnie ograniczenia wykorzystywanych w tych badaniach narzędzi stały się impulsem do poszukiwania nowych metod syntezy dźwięku.

Obydwie opracowane metody zostały zaprezentowane w kontekście zaproponowanej przez autora klasyfikacji metod syntezy dźwięku, zgodnie z którą podstawowy podział obejmuje dwie grupy metod: bezpośrednie i pośrednie. Zasady działania metod z pierwszej grupy są skoncentrowane bezpośrednio na wytworzeniu dźwięku, jego parametrach i cechach. W drugiej grupie zasady działania koncentrują się na pośrednim modelu lub koncepcji, które dopiero w efekcie mogą wytworzyć dźwięk. Najistotniejsza z punktu widzenia inżynierii dźwięku różnica jest widoczna w kontrolowanych parametrach. Sterowanie procesem syntezy w metodach bezpośrednich dotyczy parametrów dźwięku, natomiast w metodach pośrednich – parametrów modelu.

Podjęta przez autora tematyka badawcza związana jest z zagadnieniami inżynierii dźwięku, akustyki muzycznej oraz psychoakustyki. Syntetyczne wytwarzanie sygnału akustycznego leży w zakresie pierwszego z wymienionych obszarów. Związki z akustyką muzyczną są obecne w problematyce modelowania bądź to samych instrumentów, bądź też ich dźwięku. Psychoakustyka jest z kolei elementem pozwalającym ocenić efekt percepcyjny projektowanych rozwiązań.

2.1 Waga i uzasadnienie podjęcia tematu

Historia współczesnej syntezy dźwięku sięga przełomu XIX i XX wieku. Na przestrzeni ponad 100 lat syntezatory znalazły szerokie zastosowania w muzyce i przemyśle muzycznym, przewyższając tradycyjne instrumenty w zakresie możliwości kontroli parametrów wytwarzanego dźwięku. Ta cecha pozwoliła im z jednej strony imitować i zastępować istniejące instrumenty, a z drugiej umożliwiła artystyczne eksperymenty w sferze poszukiwań nowych środków wyrazu. O ile jednak zastosowania syntezatorów dźwięku łączone są w głównej mierze z obszarem sztuki, o tyle wiedza dotycząca metod syntezy oraz ich implementacji wiąże się nieomal w całości z obszarem nauk inżynierijno-technicznych.

Oczywiste są powiązania syntezy dźwięku – szczególnie w nowszych, cyfrowych implementacjach – z technikami przetwarzania sygnałów. Bardziej fundamentalne jednak jest jej silne zakorzenienie w takich obszarach wiedzy jak inżynieria dźwięku i mechanika. To ostatecznie w kategorii fizycznego, mechanicznego zjawiska muszą być rozpatrywane zarówno same metody syntetycznego wytwarzania dźwięku, jak również cechy i parametry osiągniętego efektu. Jedynie podejście oparte na zrozumieniu zasad mechaniki, rządzących procesami powstawania dźwięku w instrumentach muzycznych, pozwala spojrzeć na zagadnienie syntezy dźwięku w sposób pełny, zaczynając od właściwych podstaw. Nie daje takiej możliwości ujęcie czysto muzyczne, ani nawet podejście oparte o techniki przetwarzania sygnałów. Pomimo tego bowiem, że przetwarzanie sygnałów pozwala przeprowadzać, niejednokrotnie bardzo zaawansowane, działania na sygnale akustycznym, samo z siebie nie prowadzi do analogii z zachodzącymi w rzeczywistości procesami fizycznymi.

Tymczasem analogie takie występują nie tylko w przypadku metod syntezy wykorzystujących modelowanie fizyczne, ale zasadniczo w każdym podejściu które ma funkcjonować w roli odpowiadającej instrumentowi muzycznemu. W syntezie addytywnej może to być generowanie składowych harmonicznym i kształtowanie ich ewolucji, podobnie jak ma to miejsce w jednowymiarowych strukturach drgających, w subtraktywnej – filtracja naśladowująca działanie m.in. korpusu rezonansowego, a w samplingowej – wykorzystanie wprost nagrania dźwięku rzeczywistego obiektu. Nawet synteza metodą modulacji częstotliwości (ang. *frequency modulation* – FM), choć należy do grupy metod abstrakcyjnych, usiłuje kształtować widmo dźwięku i jego ewolucję na wzór ich odpowiedników w instrumentach akustycznych, manipulując w tym celu indeksem modulacji oraz stosunkiem częstotliwości nośnej i modulatora. Przykłady można mnożyć.

Cechy wytwarzanego dźwięku powinny bowiem mieć podłoże, a co najmniej do pewnego stopnia korespondować z rzeczywistymi procesami fizycznymi. W przeciwnym wypadku, jak pokazują przykłady wielu eksperymentalnych technik abstrakcyjnych, koncepcyjnie niewątpliwie interesujących, efektem jest dźwięk o niezrozumiałych, nieczytelnych dla słuchacza cechach. Dlatego też w ujęciu prezentowanym w monografii wyraźnie podkreślane są związki generowanych sygnałów ze zjawiskami fizycznymi zachodzącymi w instrumentach muzycznych.

Synteza dźwięku, po obserwowanym w ostatnich dekadach wyhamowaniu jej rozwoju, przeżywa obecnie renesans związany z jednej strony z olbrzymim zapotrzebowaniem na syntetyczne instrumenty, a z drugiej – z możliwościami współczesnych komputerów, które przejęły rolę nośnika algorytmów, czy też mechanizmów syntezy. Zapotrzebowanie na syntezatory jest skutkiem przemian społecznych, które doprowadziły do tego, że znacznie większa część społeczeństwa, dotychczas zadowolająca się jedynie odbiorem sztuki, obecnie próbuje swoich sił na polu różnego rodzaju twórczości. Jednym z motorów tych przemian jest fakt, że dzięki powszechnej łączności twórczość taką można obecnie niezwykle łatwo i szybko publikować. Ten rodzaj działalności artystycznej sprzyja z kolei powstawaniu rozwiązań łączących łatwość użytkowania i uniwersalność z relatywnie niewielkimi kosztami.

Synteza dźwięku są w stanie spełnić wszystkie te warunki jednocześnie. Stawiane są jednak przed nimi rosnące wymagania: w kwestii jakości dźwięku, oryginalnych i nowych brzmień, sposobów sterowania, kompatybilności z nowymi urządzeniami itd. Zapotrzebowanie na doskonalsze metody syntezy jest silnym impulsem do poszukiwań nowych rozwiązań w tej dziedzinie.

Drugim, z naukowego punktu widzenia ważniejszym impulsem do rozwoju nowych metod syntezy dźwięku, jest chęć poszerzenia palety narzędzi do badań w zakresie percepcji dźwięku oraz szerzej rozumianych zjawisk związanych z procesami słyszenia. Nowe, bardziej finezyjne metody pomiaru reakcji na bodźce akustyczne pozwalają na badanie bardziej złożonych procesów, gdzie dzięki zjawisku emergencji zachodzą zjawiska które nie mogły być obserwowane w badaniach na sygnałach elementarnych. Przykładem takich badań jest percepcja struktur muzycznych, takich jak np. przebiegi akordowe, zawierających bądź nie, różnego rodzaju błędy, które powinny być wykrywane przez dyrygenta lub realizatora dźwięku. Badania tego typu były już uprzednio prowadzone przez autora monografii, w oparciu o teorię analizy sceny słuchowej. Jednym z istotniejszych wniosków był ten o konieczności stosowania w badaniach złożonych sygnałów akustycznych, zbliżonych do dźwięku instrumentów akustycznych, tj. zachowujących zmienność większej liczby parametrów jednocześnie. W przeciwnym wypadku zachodzi sztuczna fuzja percepcyjna, a odbiór zachodzących zjawisk odbiega od rzeczywistości i nie może być podstawą do wnioskowania o zachowaniu słuchu w normalnych warunkach. Wyniki te zostały opublikowane w pracy doktorskiej oraz powiązanych tematycznie artykułach.

Pomimo szerokiego i rosnącego zainteresowania syntezą dźwięku, brakowało w ostatnich latach nowego opracowania, omawiającego współczesne metody i techniki w sposób możliwie kompletny a zarazem prezentujący temat z punktu widzenia inżyniera dźwięku: osoby mogącej być nie tylko użytkownikiem, ale często również konstruktorem syntezy. Ostatnie tego typu pozycje, jak prace C. Roads, czy T. Tolonen, V. Välimäkiego i M. Karjalainena, powstały jeszcze w latach dziewięćdziesiątych – a więc już kilkadziesiąt lat temu. W tym okresie nastąpił jednocześnie skokowy rozwój dostępnych mocy obliczeniowych oraz znaczna poprawa parametrów toru fonicznego. Z uwagi na powyższe, zasadna stała się więc nie tylko potrzeba opracowania nowych metod syntezy, ale i nowe ujęcie, próbujące objąć całość współczesnie dostępnych technik.

2.2 Cel i zakres opracowania

Celem monografii jest prezentacja nowych, autorskich metod syntezy dźwięku, reprezentujących dwa główne obszary muzycznych zastosowań syntezy. Pierwszym z tych obszarów jest reprodukcja muzyki na podstawie zapisu nutowego, czyli konwersja symbolicznej reprezentacji muzyki do jej postaci dźwiękowej. Drugi obszar obejmuje wykonywanie muzyki na żywo z syntezatorem w roli instrumentu.

Jak wcześniej wspomniano, od lat dziewięćdziesiątych XX w. nie pojawiło się kompletne i aktualne opracowanie tematu syntezy adresowane do inżynierów dźwięku, a jedynie sporadyczne prace kierowane do użytkowników syntezy. W takiej sytuacji prezentacja nowych metod byłaby pozbawiona odpowiedniego kontekstu, możliwości odniesień i porównań. Dlatego też zdecydowano się na rozbudowę monografii o część szerzej omawiającą inne istniejące i stosowane obecnie metody i techniki syntezy dźwięku wraz z wybranymi implementacjami. Cześć ta, oprócz omówienia koncepcji i założeń poszczególnych metod, przedstawia analizę ich możliwości w kontekście realizacji określonych zadań stawianych syntezatorom w zastosowaniach muzycznych oraz porusza problematykę ich implementacji. Omawianą problematykę starano się ująć w taką formę, aby praca mogła być użyteczną

pomocą i punktem wyjścia dla inżynierów dźwięku niezależnie od tego, czy zajmują się jedynie wykorzystaniem, czy również projektowaniem i budową syntezyatorów.

Przegląd i analizę możliwości dotychczas istniejących metod syntezy oparto na wspomnianej wcześniej autorskiej koncepcji ich klasyfikacji, uwzględniającej istotę zasady wykorzystanej do generowania dźwięku. Do grupy metod bezpośrednich zaliczono metody widmowe, tj. addytywną i subtraktywną, a także metody oparte na bezpośrednim operowaniu zarejestrowanym sygnałem akustycznym, tj. syntezę tablicową, samplingową, granularną oraz konkatenacyjną. Do tej grupy można także zaliczyć autorską metodę montażu frazy.

Wśród metod pośrednich można wyróżnić dwie podgrupy: metod abstrakcyjnych oraz metod modelowania fizycznego. Metody abstrakcyjne obejmują metodę modulacji częstotliwości (FM), kształtowanie fali, a także szereg mniej popularnych ujęć tematu generowania sygnału akustycznego, łącznie klasyfikowanych jako metody niestandardowe, których przykładem mogą być synteza z wykorzystaniem automatów komórkowych, czy też różnorodne metody graficzne. Nazywanie drugiej podgrupy metod pośrednich metodami modelowania fizycznego bywa zasadnie kwestionowane, jednak ze względu na długą tradycję tego nazewnictwa w syntezie dźwięku, w prezentowanej monografii zostało ono zachowane. Podgrupa ta obejmuje przede wszystkim modelowanie instrumentów z wykorzystaniem metody różnic skończonych i syntezę falowodową, ale też mniej już obecnie popularne techniki, takie jak m.in. sieci elementów o parametrach skupionych, synteza modalna, czy metoda Karplusa-Stronga. W tej klasyfikacji autorska metoda syntezy dźwięku nierealizowalnych instrumentów ma zarówno pewne cechy modelowania fizycznego, jak również – choć w mniejszym stopniu – metod abstrakcyjnych.

Poza metodami, które można dziś już uznać za konwencjonalne, szeroko opisywane w literaturze, praca przybliży także szereg nowych lub mniej znanych metod, do tej pory rzadko omawianych w opracowaniach książkowych. Najważniejszą z nich jest synteza konkatenacyjna, której popularność zaczyna wzrastać dzięki pojawieniu się pierwszych komercyjnych implementacji. Inną obiecującą metodą jest synteza oparta na technikach głębokiego uczenia, znajdująca się obecnie jeszcze w fazie wczesnych eksperymentów. Ponadto pokazano nowe warianty metod wcześniej znanych. Jednym z przykładów takich wariantów jest odmiana metody terenu falowego, w której zachodzi uprzestrzennienie pewnych cech barwowych dźwięku w oparciu o strategię mapowania wykorzystujące elementy psychoakustyki. Innym przykładem nowego wariantu znanej metody może być skryptowanie w syntezie samplingowej.

Na tym szeroko zarysowanym tle zaprezentowane są dwie nowe, autorskie metody syntezy. Pierwsza z nich, metoda montażu frazy, reprezentuje grupę metod przeznaczonych przede wszystkim do realistycznej reprodukcji zapisu nutowego. Łączy ona wybrane cechy metody konkatenacyjnej i samplingowej z elementami sekwencera wspartego algorytmami symulacji technik wykonawczych i interpretacyjnych. Druga z metod opiera się na pewnym paradoksie, czyli numerycznej symulacji instrumentów nierealizowalnych. Polega ona na modelowaniu fizycznym obiektów wytwarzających dźwięk, w których celowo łamie się określone zasady, bądź też przekracza możliwe do zaistnienia zakresy parametrów. Powstałe w efekcie instrumenty zachowują pewne cechy obiektów rzeczywistych, co ułatwia ich intuicyjną kontrolę. Jednocześnie jednak wytwarzany przez nie dźwięk przejawia nowe, często złożone i interesujące właściwości, które zostały zaprezentowane i poddane analizie.

W części monografii dotyczącej pierwszej z autorskich metod omawiana jest koncepcja metody montażu frazy oraz oparty na tej koncepcji syntezyator: od założeń projektowych, przez zasadę działania, korpus, zastosowane techniki i szczegóły implementacji, aż do oceny uzyskanego efektu. Część ta rozpoczyna się opisem specyfiki zadania jakim jest reproduk-

cja zapisu nutowego oraz wskazaniem dwóch metod uznawanych za najlepiej nadające się do jego realizacji: syntezy samplingowej i konkatencyjnej. Na podstawie analizy możliwości oraz problemów obydwu metod wprowadzona zostaje koncepcja metody montażu frazy, której celem jest połączenie wybranych cech samplingu i metody konkatencyjnej, przy jednoczesnej próbie uniknięcia ich najważniejszych wad: problemów samplingu z generowaniem sekwencji łączonych dźwięków charakterystycznych dla instrumentów melodycznych oraz wysokiej złożoności i dużej podatności na błędy syntezy konkatencyjnej.

Fundamentalne dla prezentowanej metody pojęcie frazy zostaje zdefiniowane w odmiennym niż ściśle muzyczny, akustycznym kontekście. Wprowadzone zostaje także pojęcie próbki wielonutowej, a w końcu – koncepcja łączenia takich próbek we frazę. Dalej przedstawiona jest szczegółowa zasada działania synteźatora opartego na opisywanej metodzie wraz z założeniami dotyczącymi jego implementacji. Istotnym elementem jest struktura i zawartość korpusu: dzięki zastosowaniu zbioru próbek o określonej zawartości i organizacji metoda montażu frazy może pominąć wiele etapów procesu syntezy obecnych w metodzie konkatencyjnej, takich jak zmiana częstotliwości podstawowej, czy skomplikowany, oparty o systemy bazodanowe proces dopasowania istniejących nagrań do celu syntezy. Jednocześnie zachowana zostaje możliwość generowania naturalnych przejść między wysokościami. Obok struktury korpusu przedstawiono również techniki wykorzystane do jego utworzenia.

Po omówieniu problematyki próbek dźwiękowych i korpusu zaprezentowane zostają szczegółowe omówienia procedur, technik i algorytmów wykorzystanych w procesie syntezy. Ta część opracowania jest dopełniona licznymi schematami ilustrującymi ich działanie. Na koniec opisana zostaje testowa, modułowa implementacja metody zrealizowana w języku GNU Octave, przygotowana w ramach Projektu Badawczego Narodowego Centrum Nauki (2013–2016) zatytułowanego *Osiągnięcie realizmu brzmieniowego w samplingowej syntezie dźwięku grupy dętej orkiestry symfonicznej*. Część dotycząca metody montażu frazy kończy się prezentacją wyników testów przeprowadzonych w celu określenia użytecznych zakresów parametrów procesu syntezy oraz propozycjami potencjalnych ulepszeń i rozwinięć opracowanej techniki.

Ze względu na odmienną specyfikę i przewidywane zastosowania, część monografii dotycząca metody nierealizowalnych instrumentów ma nieco inny porządek. Poza zaprezentowaniem koncepcji metody porusza ona problematykę działania modeli numerycznych w czasie rzeczywistym i prezentuje przykłady implementacji wybranych instrumentów na procesorach równoległych, aby w końcu przejść do omówienia kilku typów instrumentów nierealizowalnych. Część ta rozpoczyna się krótkim zestawieniem metod syntezy posiadających cechy pożądane z punktu widzenia gry na żywo, gdy synteźator działa i jest kontrolowany w czasie rzeczywistym. Prezentacja koncepcji metody obejmuje definicję niemożliwych instrumentów oraz uzasadnienie wprowadzenia takiej koncepcji do syntezy dźwięku. Obok koncepcji zostaje zaprezentowany i omówiony ogólny schemat implementacji metody, obejmujący poza głównym modułem dwa dodatkowe elementy: proces obliczeniowy modelu oraz program obsługi kontrolera instrumentu. W związku z wykorzystaniem metod modelowania fizycznego do pracy w czasie rzeczywistym rozważany jest aspekt zapewnienia wystarczającej mocy obliczeniowej. W tym celu wykorzystane zostają procesory graficzne – GPU (ang. *graphics processing units*).

W istniejącej literaturze można znaleźć przykłady realizacji synteźatorów wykorzystujących do obliczeń GPU. Przykłady te opierają się jednak na bibliotekach związanych z jednym producentem. Realizacja opisana w monografii oparta jest na wykorzystaniu alternatywy w postaci otwartego standardu, dostępnego dla szerokiej gamy urządzeń obliczeniowych: OpenCL. Przedstawione są elementy i koncepcje standardu, wraz z pojęciem

obliczeń heterogenicznych, a następnie implementacja modelu pojedynczej oraz wielu strun z wykorzystaniem metody różnic skończonych. Omówienie implementacji jest uzupełnione schematami oraz fragmentami kodu źródłowego.

Kluczowym elementem tej części opracowania jest prezentacja trzech grup niemożliwych instrumentów: obiektów o większej liczbie wymiarów, o niemożliwych do zaistnienia warunkach brzegowych, a także tych, których właściwości podlegają w trakcie gry ewolucji. Zaprezentowane są matematyczne sformułowania modeli oraz odpowiadające im schematy różnicowe i wybrane aspekty ich implementacji. W każdym z przypadków omówione zostają interesujące cechy uzyskanych na drodze symulacji sygnałów.

2.3 Przeprowadzone prace, badania i analizy

Muzyczne zastosowania syntezy dźwięku obejmują dwa główne scenariusze. Pierwszym jest gra na syntezatorze w czasie rzeczywistym, z wykorzystaniem fizycznego kontrolera, jak na tradycyjnym instrumencie. Drugim jest reprodukcja sygnału akustycznego na podstawie symbolicznego zapisu – partii nutowej. Duża część spośród tradycyjnych metod syntezy może być i bywa wykorzystywana w obydwu z nich. Kosztem tej uniwersalności jest jednak pominięcie dodatkowych, ale różnych w każdym ze scenariuszy możliwości.

Dla gry na żywo możliwości te są związane z kontrolą instrumentu przez muzyka w zakresie wykraczającym poza zapis nutowy, co jest elementem tzw. interpretacji. Występuje tutaj dodatkowa, niezapisana w nutach, zmienność parametrów generowanego dźwięku w mniejszej skali, a także zmienność parametrów nie objętych wprost zapisem nutowym. Przy zastosowaniu odpowiedniego kontrolera i jego mapowania na właściwe parametry syntezy, o ile dany syntezator pozwala takie parametry kontrolować, daje to możliwość uzyskania wysoce ekspresyjnej gry na syntetycznym instrumencie.

Reprodukcja daje z kolei możliwość wglądu do całości zapisu nutowego przed rozpoczęciem procesu syntezy. Syntezator może tym samym odwzorować proces zachodzący w przypadku pracy żywego muzyka, który najpierw analizuje nuty poznawanego utworu, aby na tej podstawie je zinterpretować, wprowadzając zamierzone odchylenia od zapisanych danych lub kontrolując dane nie ujęte w zapisie. Sytuacja ta jest o tyle bardziej złożona od gry na żywo, w której dane wejściowe są kompletne, że obejmuje wygenerowanie dodatkowej informacji poza danymi zapisanymi w nutach. Doświadczony wykonawca jest w stanie takie zadanie wykonać, ale w przypadku zastąpienia człowieka mechanizmem lub algorytmem grającym muzykę z nut, sztuczna interpretacja lub wręcz jej brak jest bardzo łatwo zauważalny dla słuchacza. Reprodukcja daje jednak możliwość wglądu do całości zapisu nutowego przed rozpoczęciem procesu syntezy. Syntezator może tym samym odwzorować proces zachodzący w przypadku pracy żywego muzyka, który najpierw analizuje nuty, aby na tej podstawie je zinterpretować, wprowadzając odchylenia od zapisanych danych oraz generując wartości parametrów nie ujętych w nutach.

Obydwe omawiane w monografii autorskie metody syntezy należy traktować jako metody specjalizowane i dedykowane w głównej mierze jednemu z wymienionych scenariuszy. Metoda montażu frazy jest przeznaczona do reprodukcji muzyki z zapisu nutowego i opiera się na symulacji procedury interpretacji nut przez muzyka. Metoda nierealizowalnych instrumentów udostępnia z kolei szereg parametrów syntezy pozwalających na intuicyjną kontrolę barwy oraz innych cech generowanego dźwięku w grze na żywo.

2.3.1 Metoda montażu frazy

Montaż frazy może być traktowany jako odmiana syntezy samplingowej, ponieważ do generowania wykorzystuje nagrane próbki instrumentów. Inaczej jednak niż w samplach,

próbki te zawierają nie pojedyncze dźwięki, lecz ich sekwencje, interwały i tetrachordy, w czym przypominają odcinki wykorzystywane w syntezie konkatenacyjnej. W odróżnieniu z kolei od tej drugiej, metoda montażu frazy bazuje na dobrze zdefiniowanym korpusie, który został tak dobrany, aby móc odwzorować dowolną linię melodyczną w ramach skali wybranego instrumentu bez potrzeby przestrajania próbek. Jedyne potrzebne przekształceniami są cięcia i montaż. Tym samym metoda ta łączy zaletę samplingu, jego prostotę, z nieosiągalną dla samplów możliwością reprodukcji płynnych i naturalnych przejść między dźwiękami. W celu osiągnięcia lepszego efektu, przed montażem parametry frazy są modyfikowane w oparciu o szereg tzw. reguł wykonawczych, np. reguł frazowania. Wprowadzają one charakterystyczne dla gry żywego wykonawcy odchylenia od dosłownej i równej interpretacji zapisu nutowego.

W ramach prac badawczych, poza założeniami i szczegółowym sformułowaniem metody, powstała jej prototypowa implementacja. Przeprowadzono również szereg testów z udziałem eksperckich grup odsłuchowych, mających na celu ustalenie użytecznych zakresów parametrów pracy syntezy. Generowanie frazy wymaga przeprowadzania operacji na dwóch formach zapisu muzyki – na symbolicznym zapisie nutowym oraz na nagraniach. Na jego potrzeby opracowano bądź przystosowano szereg opisanych w pracy algorytmów. Część z nich odpowiada za analizę muzyczną zapisu nutowego, jak algorytm wyszukiwania fraz, czy dopasowania wielonutowych próbek do frazy. Pozostałe odpowiadają za procesy zachodzące podczas przekształcania i łączenia próbek. Są to m.in. oparte o cięcie i montaż przekształcenia czasu trwania, wykorzystujące przenikanie krzyżowe (tzw. *crossfade*) z dopasowaniem fazy, bądź też przekształcenia nakładające na nagranie różne formy łuku frazowego.

Koncepcja metody montażu frazy

Metoda montażu frazy opiera się na dwóch obserwacjach. Z pierwszej z nich wynika, że zaawansowany użytkownik syntezy często ręcznie dopasowuje wykorzystywane próbki dźwiękowe do kontekstu, tj. do innych, otaczających je próbek, z uwzględnieniem założonego muzycznego efektu końcowego – np. barwowego lub dynamicznego¹. Druga obserwacja wskazuje na fundamentalny problem metody samplingu z łączeniem dźwięków w spójną frazę. Każdy nagrany dźwięk posiada bowiem swoją własną fazę ataku, która w wielu melodycznych instrumentach nie występuje bądź zmienia się, gdy wykonawca realizuje tzw. frazę *legato*, łącząc sąsiednie dźwięki. Wówczas w miejsce kolejnych ataków pojawiają się fazy przejściowe, niosące inny rodzaj informacji. Tradycyjne próbki wykorzystywane w samplach nie zawierają tej informacji, a jej odtworzenie następuje dużymi trudnościami – nie daje zadowalających efektów przy zastosowaniu prostych technik, takich jak filtracja i nakładanie obwiedni, inny wariant wymaga z kolei zastosowania np. addytywnej resyntezy, co pociąga za sobą konieczność szczegółowej analizy posiadanych próbek i znacząco komplikuje algorytm syntezy.

Efektom poszukiwania rozwiązań dla obydwu wymienionych problemów, tj. automatyzacji doboru próbek oraz umożliwienia generowania naturalnych przejść między dźwiękami, jest koncepcja syntezy metodą montażu frazy. Kwestią podstawową było zdefiniowanie celu poszukiwanych ulepszeń. Ze względu na zadowalające efekty samplingu w przypadku oddzielanych dźwięków, nową procedurę postanowiono oprzeć na tej metodzie, modyfikując jednak jej zachowanie w przypadku syntezy ciągu łączonych dźwięków. Wprowadzono techniczną definicję frazy, nieco odbiegającą od definicji muzycznej, mającą na celu okre-

¹W tym miejscu termin *dynamika* występuje w swoim znaczeniu muzycznym, tj. elementu dzieła muzycznego obejmującego ogół zjawisk związanych z głośnością.

ślenie granic odcinka zapisu nutowego w którym występują wyłącznie płynne przejścia między dźwiękami.

Tak rozumiana fraza zawiera tylko jedną fazę ataku dźwięku – dla pierwszego dźwięku w ciągu. Kolejne dźwięki są osiągane z pominięciem ataków, przechodząc dalej naprzemiennie przez fazy quasi-stacjonarne oraz przejściowe. W monografii określono szereg warunków, które pozwalają wyznaczyć granice frazy na podstawie zapisu nutowego. Są to m.in. pauzy, duże skoki wysokości pomiędzy sąsiednimi dźwiękami, czy też określone oznaczenia artykulacyjne. Pierwszym etapem syntezy jest zatem podzielenie całości zapisu nutowego na oddzielne frazy.

Drugim filarem koncepcji nowej metody jest wyjście poza tradycyjne próbki zawierające pojedyncze nuty. Tego typu podejście bywa stosowane w metodzie konkatenacyjnej i daje dobre rezultaty w syntezie mowy, jednak w zastosowaniach muzycznych okazuje się ono bardzo skomplikowane i podatne na błędy. Bazując najczęściej na istniejących nagraniach, wymaga bowiem dokonania tzw. transkrypcji, czyli identyfikacji i określenia położenia poszczególnych nut w nagraniu. W metodzie montażu frazy zastosowano podejście alternatywne, oparte na wiedzy muzycznej, wykorzystujące doświadczenia autora w pracy dyrygenta oraz wieloletnie doświadczenia w roli instrumentalisty-skrzyпка. Wiedzę tę konsultowano z bardziej doświadczonym dyrygentem – kierownikiem projektu Narodowego Centrum Nauki, w ramach którego rozwijano przedmiotową metodę dla grupy instrumentów dętych, a jednocześnie Kierownikiem Katedry Dyrygentury Akademii Muzycznej w Krakowie, prof. dr hab. Rafałem Jackiem Delektą – oraz z kompozytorami.

Uwzględniając typowe linie melodyczne instrumentów spotykane w literaturze muzycznej, określono zawartość zbioru próbek dźwiękowych pozwalającą na reprodukcję dowolnej sekwencji wysokości, która może wystąpić jako fraza w muzyce. Próbki te zostały zarejestrowane w studiu nagrań Akademii Muzycznej w Krakowie – na instrumentach grali pracownicy Akademii, zaś nagrania realizował personel studia. Przez odpowiedni dobór próbek wyeliminowano podstawowe problemy występujące w metodzie konkatenacyjnej: nie ma potrzeby przestrajania próbek przed ich łączeniem, korpus syntezy jest ściśle określony i nie wymaga systemu bazodanowego do nawigacji w zbiorze próbek, a zawartość muzyczna próbek – jednogłosowe sekwencje 2–5 dźwięków – jest na tyle prosta, że nie prowadzi do dużych trudności w określeniu położenia poszczególnych dźwięków w nagraniu.

Montaż frazy polega na znalezieniu najlepszej sekwencji próbek, która po połączeniu utworzy docelową frazę. Próbki te są ze sobą łączone na odcinkach quasi-stacjonarnych (w tzw. fazie podtrzymania dźwięku, ang. *sustain*). W montażu wykorzystywany jest atak wyłącznie pierwszej próbki, podczas gdy z kolejnych próbek wykorzystywane są sekwencje przejść między dźwiękami i faz podtrzymania. Próbki łączone są ze sobą na wspólnej nucie, nakładanej na siebie z wykorzystaniem przenikania.

Należy zauważyć, że już w tak krótkich sekwencjach dźwięków jak zastosowane próbki wielonutowe widoczne są pewne elementy interpretacyjne, tzn. małe odchylenia w zakresie wysokości, czasu trwania, głośności, czy barwy. Odchylenia te są celowo pozostawione, składając się – razem z naturalnymi przejściami między dźwiękami – na ostateczne wrażenie realizmu generowanej frazy. Jak wcześniej zaznaczono, jest to tylko jeden z etapów realizacji elementów interpretacyjnych. Drugim jest zastosowanie reguł wykonawczych, wprowadzających do frazy odchylenia na poziomie globalnym.

Korpus

Korpus ma strukturę drzewa o trzech poziomach gałęzi: instrumentu, typu i podtypu próbki. W zrealizowanej w ramach projektu NCN implementacji nagrano próbki 10 in-

strumentów dętych orkiestry symfonicznej: fletu piccolo, fletu, oboju, rożka angielskiego, klarnetu, fagotu, trąbki, waltorni, puzonu i tuby. Dla każdego instrumentu występują te same trzy typy próbek: jednonutowe, interwałowe i tetrachordowe.

Próbki jednonutowe zawierają podtypy ze specjalnymi, oddzielanymi artykulacjami (np. różne warianty *staccato*) do stosowania w sytuacjach, gdy nie ma potrzeby łączenia frazy. Ważnymi podtypami są także próbki zawierające bardzo długie dźwięki. Są one wykorzystywane w algorytmach zmiany tempa zarejestrowanych sekwencji.

Próbki interwałowe są podstawowym budulcem frazy. Zawierają pary dźwięków zabranych po sobie bez oddzielania. Występują warianty od sekundy małej, tj. stosunku częstotliwości podstawowych równej w przybliżeniu $2^{1/12}$, do oktawy czystej, tj. dwukrotnej zmiany częstotliwości podstawowej. Każdy interwał zarejestrowano w dwóch różnych tempach (60 i 120 BPM), na dwóch różnych poziomach dynamicznych (*mezzo piano* i *forte*) oraz w dwóch kierunkach zmiany wysokości. Dodatkowo, częściej używane interwały nagrano kilkukrotnie, do wymiennego stosowania, celem uniknięcia słyszalnej powtarzalności.

Tetrachordy są sekwencjami wysokości zawierającymi dolne lub górne połowy skal muzycznych. Ich wykorzystanie jest uzasadnione tym, że w płynnych liniach melodycznych przeważającym rodzajem ruchu jest ruch sekundowy (o interwał sekundy), stąd zastosowanie odcinków skal pozwala na częste wykorzystanie nagrań dłuższych sekwencji w miejsce par dźwięków. Podobnie jak interwały, tetrachordy są nagrane w dwóch wariantach tempa i dynamiki oraz w dwóch kierunkach.

W ramach każdego podtypu korpus zawiera szereg próbek pokrywających całą skalę instrumentu, tj. rozpoczynających się od wszystkich wysokości, od których da się na danym instrumencie zrealizować określoną strukturę wysokości. Tym samym w zakresie wysokości korpus jest kompletny i nie wymaga przestrajania próbek do osiągnięcia części wysokości, co ma miejsce w metodzie konkatencyjnej.

Próbki wielonutowe są przed wykorzystaniem poddawane segmentacji, której efektem jest określenie położenia kolejnych nut w nagraniu, a dodatkowo w ramach każdej nuty obszarów podtrzymania dźwięku. Są to informacje niezbędne do określenia miejsc łączenia próbek w procesie montażu frazy. Możliwe jest zastosowanie różnych technik segmentacji. Jedną z nich, opartą o autokorelacyjną detekcję częstotliwości podstawowej z korekcją typowych błędów, wykorzystaną do analizy dużej części próbek, została opisana w monografii.

Każda próbka, poza przypisaniem do instrumentu, typu i podtypu, posiada dokładny opis symboliczny jej zawartości muzycznej, tj. oznaczenia kolejnych wysokości oraz wyniki działania algorytmu segmentacji określające granice obszarów dopuszczalnych dla łączenia.

Zastosowane techniki i algorytmy

Po wydzieleniu z zapisu nutowego pojedynczej frazy, co następuje jeszcze na poziomie reprezentacji symbolicznej, poszukiwana jest najlepsza sekwencja próbek z których docelowa fraza może zostać zbudowana. Kryterium wyboru określonego zestawienia jest minimalna liczba łączy między próbkami, zakładane jest bowiem, że łączenia niosą ze sobą pewne ryzyko wystąpienia słyszalnych nieciągłości w generowanym dźwięku. Uwzględniając skończony rozmiar korpusu, algorytm jest w stanie zbadać i ocenić wszystkie możliwe połączenia – w każdym potencjalnym punkcie łączenia tylko niewielka liczba próbek zawiera jednocześnie ostatni ustalony oraz jeden lub więcej następnych dźwięków docelowej sekwencji.

W kolejnym etapie wyselekcjonowane próbki zostają połączone we frazę. Wykorzystując symboliczne opisy próbek syntezy jest w stanie określić miejsca, w których może dokonać ich cięcia i łączenia. Łączenie odbywa się z wykorzystaniem techniki przenikania krzyżowego (ang. *crossfade*), uzupełnionej o wcześniejsze dopasowanie faz łączonych próbek. Biorąc pod uwagę, że w miejscu łączenia próbki zawierają nagranie tego samego instrumentu i tej samej wysokości, dopasowanie faz jest niezbędne celem uniknięcia słyszalnych zmian amplitudy sygnału na przestrzeni łączonego odcinka, co miałyby miejsce, gdyby pozostawiono przypadkowe wartości faz, wynikające jedynie z docelowego położenia próbek we frazie. Przesunięcia w czasie wywołane dopasowaniem faz nie są odczuwalne jako zaburzenia tempa przebiegu w zakresie występujących w próbkach częstotliwości podstawowych.

O ile wysokości dźwięków muzycznych można zdyskretyzować i zapisać jako osobne próbki, o tyle technika *multisamplingu* nie daje się zastosować do czasu trwania, który może przyjmować potencjalnie dowolne wartości. Rozwiązaniem problemu jest częściowa dyskretyzacja, a następnie dopasowanie tempa. W demonstracyjnej implementacji metody próbki wielonutowe nagrane są w dwóch tempach. Do sekwencji próbek wchodzi te, które wymagają mniejszej korekty czasu trwania zawartych w nich dźwięków. Korekta może następować w dwie strony. Skrócenie dźwięku oraz – w małym zakresie – jego wydłużenie odbywa się poprzez przesunięcie docelowych położenia próbek we frazie. Gdy jednak czas trwania docelowej wartości rytmicznej przekracza sumaryczny czas trwania faz podtrzymania obydwu nut, skrócony o odcinek przenikania, konieczne jest włączenie do sekwencji dodatkowej, dłuższej próbki, pozwalającej już w znacznym stopniu wydłużyć docelową wartość. W razie potrzeby procedurę można iterować. Tym sposobem można uzyskać nie tylko dowolne tempo, ale i dowolny przebieg rytmiczny, jak również wprowadzić do frazy zaburzenia tempa związane z regułami wykonawczymi.

W przypadku syntezy dźwięku instrumentów akustycznych, a szczególnie w scenariuszu realizowanym w metodzie montażu frazy, tj. w reprodukcji zapisu nutowego, jednym z kluczowych elementów jest realistyczna symulacja nie tylko dźwięku instrumentu, ale również sposobu interpretacji nut przez żywego wykonawcę. Montaż frazy wykorzystuje w tym celu dwa mechanizmy. Pierwszym z nich są próbki wielonutowe, zawierające elementy interpretacji muzycznej w małej skali, czyli obecne w nagraniu odchylenia od ścisłej reprodukcji warstwy nutowej. Drugi mechanizm jest oparty na tzw. regułach wykonawczych. Reguły te sformułowano do zastosowania w sekwencjach łączonych z tradycyjnymi syntezytorami. Opisują one określony kontekst muzyczny oraz odpowiadającą mu zmianę wartości określonych parametrów. Przykładem jest wykonywanie przebiegu melodycznego nieco szybciej, gdy jest to przebieg wznoszący, albo tzw. opóźnianie ostatniego dźwięku frazy. Zastosowanie próbek wielonutowych ogranicza konieczność stosowania reguł wykonawczych w małej skali, pozostawiając jedynie konieczność globalnego kształtowania tempa i dynamiki.

Istotnym elementem implementacji syntezytoru było określenie zakresów parametrów stosowanych algorytmów i procedur. W tym celu przeprowadzono szereg testów odsłuchowych z grupą ekspercką, których wyniki opisano w monografii. Najważniejsze z otrzymanych wyników to zakresy czasów ataku wyłączonych z procedury przenikania, ocena efektu stosowania różnych reguł wykonawczych, a także ocena efektu zastosowania dodatkowego strojenia próbek do systemu 12-TET. Co interesujące, poszczególne modyfikacje nie dają znaczącego statystycznie efektu, ale efekt ten pojawia się po ich zastosowaniu łącznie.

2.3.2 Metoda nierealizowalnych instrumentów

Metoda nierealizowalnych instrumentów reprezentuje odmienne podejście do problemu syntezy dźwięku. Została ona zaprojektowana przede wszystkim z myślą o scenariuszu, w którym muzyka jest wykonywana na żywo, a syntezator jest kontrolowany przez wykonawcę za pomocą fizycznego kontrolera. Jej głównym celem jest uzyskanie dźwięku przejawiającego nowe, interesujące z muzycznego punktu widzenia cechy, przy jednoczesnym zachowaniu klasycznych mechanizmów gry.

Jako punkt wyjścia wykorzystano technikę numerycznego modelowania obiektów fizycznych, np. strun i membran, wzbudzanych w tradycyjny sposób, taki jak szarpanie czy uderzanie. Parametry takich sposobów wzbudzenia struktur drgających można łatwo mapować z istniejących kontrolerów MIDI, co pozwala muzykowi na grę z wykorzystaniem znanych sobie technik wykonawczych. Modelowanie jest realizowane metodą różnic skończonych, która w przypadku syntezy dźwięku w czasie rzeczywistym ma tę zaletę, że w łatwy sposób generuje kolejne próbki sygnału, odczytywane np. jako położenie określonego punktu na instrumencie w kolejnych krokach symulacji, choć możliwe są bardziej złożone mechanizmy odczytu. Daje to możliwość wpływania bez opóźnień na działanie modelu.

Opis koncepcji metody jest jedną częścią opracowania, drugą zaś jest – nie mniej ważna – propozycja jej implementacji. Ze względu na relatywnie wysoką złożoność obliczeniową symulacji, proponowana implementacja wykorzystuje do obliczeń wielowątkowe rdzenie kart graficznych, co pozwala na symulację w czasie rzeczywistym większych lub bardziej złożonych obiektów, a jednocześnie umożliwia przeprowadzenie symulacji na komputerze PC, bez potrzeby wykorzystywania dedykowanych stacji roboczych.

Koncepcja nierealizowalnych instrumentów

Istota metody nierealizowalnych instrumentów opiera się na koncepcji odejścia od wybranych cech lub parametrów modelu fizycznego bądź złamania określonych reguł tak, aby symulować obiekt który nie może w rzeczywistości zaistnieć. Może to polegać na działaniu modelu w zmienionej przestrzeni, np. czterowymiarowej, bądź w określony sposób zapętłonej czy zakrzywionej. Mniej abstrakcyjne zmiany mogą dotyczyć przekroczenia zakresu parametrów związanych z wytrzymałością materiałów lub innymi cechami materiałowymi. Jeszcze innym przykładem są układy zmieniające się w czasie w sposób nieosiągalny dla rzeczywistych, akustycznych instrumentów.

O ile z punktu widzenia mechaniki lub inżynierii mechanicznej modelowanie tego typu struktur wydaje się bezcelowe, a nawet może budzić wątpliwość w zakresie zasadności wykorzystania terminu „modelowanie”, skoro obiekt będący celem modelowania nie istnieje i istnieć nie może, o tyle działanie takie wydaje się niezwykle interesujące i wysoce uzasadnione z perspektywy syntezy dźwięku. Syntezator działający w czasie rzeczywistym wytwarza dźwięk, którego parametry są kontrolowane przez wykonawcę. Jedną z cech pożądanых w syntezie jest uzyskanie nowych dźwięków. Obiekty nie istniejące w rzeczywistości niejako z definicji wytwarzają dźwięki o nowych, niespotykanych dotąd cechach, z pewnym stopniem nieprzewidywalności. Przy czym nie są to modele całkowicie abstrakcyjne – pewne właściwości łączą je z obiektami rzeczywistymi. To sprawia, że kontrolowane parametry mogą być dla wykonawcy zrozumiałe, a proces syntezy intuicyjny pomimo złamania pewnych reguł. Przykładem intuicyjnej i uniwersalnej zmiany parametrów jest wpływ na masę, czy wielkość symulowanego obiektu.

Implementacja metody

Nierealizowalny instrument jest pewnego rodzaju abstrakcją, wykonalną jednak przy połączeniu technik komputerowych z fizycznymi kontrolerami, np. z popularnymi w obszarze syntezy urządzeniami zgodnymi z protokołem MIDI. Instrument taki składa się z trzech modułów programowych. Pierwszy z nich wykonuje obliczenia, czyli bezpośrednio odpowiada za działanie modelu. Drugi komunikuje się z użytkownikiem przy użyciu kontrolera. Trzeci integruje wszystkie moduły i zarządza przesyłaniem zarówno danych sterujących, jak i generowanego sygnału. Każdy z modułów może działać w oddzielnym fizycznie urządzeniu. Moduł kontrolera można uruchomić w małym urządzeniu mobilnym, połączonym z kontrolerem. Moduł obliczeniowy wymaga jednostki obliczeniowej o większej mocy, więc można go uruchomić, także zdalnie, na osobnym komputerze. Moduł integrujący może być – zależnie od zastosowania – połączony z modułem sterującym, bądź też pracować oddzielnie, np. na komputerze przenośnym połączonym z torem fonicznym.

Jednym z podstawowych problemów metod syntezy dźwięku opartych na modelowaniu fizycznym jest duża złożoność obliczeniowa i konieczność wykorzystania relatywnie szybkich komputerów. W tym zakresie nierealizowalne instrumenty mogą mieć duże wymagania. Rozwiązaniem problemu jest wykorzystanie wszystkich dostępnych we współczesnych systemach komputerowych jednostek obliczeniowych, a szczególnie wielowątkowych procesorów obecnych w kartach graficznych (GPU). Pomimo opisanych w literaturze zakończonych sukcesem prób realizacji syntezy z wykorzystaniem pakietu CUDA udostępnianego przez firmę Nvidia, autor zdecydował się na inne podejście i wykorzystanie środowiska OpenCL. Posiada ono dwie podstawowe zalety: nie jest związane z urządzeniami określonego producenta, a więc zrealizowany syntezytor można uruchomić na dowolnym współczesnym komputerze, a po drugie nie wymaga stosowania procesorów graficznych. W przypadku ich braku można stosować inne jednostki obliczeniowe, m.in. procesory centralne (CPU), lub jednostki FPGA. Kosztem większej uniwersalności OpenCL w stosunku do CUDA jest większa abstrakcja struktury środowiska i jej mniej widoczne związki z określonymi elementami jednostek obliczeniowych, co utrudnia optymalizowanie tworzonych programów.

Monografia szczegółowo omawia, prezentując schematy i fragmenty kodów źródłowych, sposób programowania modelu instrumentu do wykonania na procesorach równoległych. Wskazano które elementy algorytmu można, a których nie da się zaimplementować równoległe. Jako prosty przykład przedstawiona jest implementacja modelu pojedynczej, a następnie wielu jednocześnie działających strun, kontrolowanych z wykorzystaniem środowiska PureData.

Wybrane przykłady

Najciekawszymi przykładami opracowanych instrumentów są wielowymiarowe membrany oraz membrany w których zastosowano różne kombinacje periodycznych warunków brzegowych. Inne przykłady obejmują instrumenty których parametry materiałowe bądź kształt zmieniają się w czasie, lub które szybko i po skomplikowanej trajektorii poruszają się względem obserwatora. Monografia omawia również inne propozycje. Co istotne, pomimo łamania określonych reguł, większa część zachowania symulowanych obiektów odpowiada oczekiwaniu użytkownika znajdującego „podobny” obiekt rzeczywisty – np. w przewidywalny sposób manifestuje się zmiana punktu pobudzenia, czy masy elementu.

Na bazie N -wymiarowego równania falowego z prostym, 1-parametrowym modelem tłumienia, wprowadzony został model membrany, który uogólniono do dowolnej liczby

wymiarów. W istocie, model ten – we współrzędnych kartezjańskich – zmienia się z liczbą wymiarów jedynie w zakresie formy Laplasjanu. Wzbudzenie zamodelowano jako proste uderzenie o kosinusowym rozkładzie przestrzennym. Przeprowadzono symulację takiego układu dla sytuacji od dwóch do pięciu wymiarów przy założeniu równych oraz różnych długości boków membrany.

Dzięki obecności większej liczby równoległych hiperpowierzchni odbijających fale rozchodzące się po membranie, w efekcie powstaje dźwięk o bardzo skomplikowanej strukturze czasowo-częstotliwościowej. Dla mniejszej liczby wymiarów w strukturze widmowej można obserwować, a także usłyszeć, osobne składowe spektralne, jednak już przy 4 wymiarach gęstość widmowa sprawia, że dźwięk zaczyna być odbierany jako bardziej szumowy, o rozkładzie energii w widmie regulowanym proporcjami membrany. W tym miejscu zaczynają jednak ogrywać rolę dodatkowe efekty, związane z dyspersją numeryczną. Powodują one powstanie skomplikowanych, lecz regularnych łukowych struktur, widocznych w spektrogramach generowanych dźwięków, o bardzo specyficznym i wyraźnie słyszalnym charakterze. Przy założeniu, że użytkownik takiego syntezyzatora może kontrolować jego geometrię, daje to duże pole do manipulacji dźwiękiem przy pomocy niewielkiej liczby parametrów.

Innym interesującym efektem jest zmiana warunków brzegowych na periodyczne. Może to dotyczyć dowolnych par brzegów membrany, niekoniecznie leżących po przeciwnych stronach obiektu. Można również obrócić brzegi względem siebie. Wprowadzenie takich modyfikacji powoduje przesunięcia części składowych spektralnych, pozostawiając inne bez zmian. W pewnym uproszczeniu można powiedzieć, że pętle dwukierunkowe zmieniają percepcję wysokości dźwięku, podczas gdy obrócenie brzegów powoduje zmianę barwy. Pętle jednokierunkowe generują z kolei specyficzny rodzaj tekstury widocznej w reprezentacji czasowo-częstotliwościowej dźwięku.

Manipulacje parametrami materiałowymi mogą prowadzić do ciekawych efektów modulacyjnych. Prezentowane przykłady obejmują strunę, której sztywność modulowana jest wolnozmienną sinusoidą. Efekt ten powoduje zmianę zarówno obwiedni widma, jak i struktury widmowej, tj. okresowego przesunięcia wyższych składowych. Inny efekt można uzyskać zmieniając kształt uderzonej membrany – okresowo lub liniowo. Przy zmianie proporcji boków następuje przesunięcie składowych spektralnych, przy czym część z nich przesuwa się w górę, a inna część – w dół.

Na koniec, przemieszczając punkt odczytu w ramach membrany można doprowadzić do powstania w widmie struktur odpowiadających działaniu na sygnał banku filtrów o zmieniających się w czasie parametrach. Zależnie od złożoności trajektorii i szybkości przemieszczania, ewolucja takiego sygnału może mieć nieoczywisty charakter, widoczny w różnej skali, jak to ma miejsce w przypadku zaprezentowanych w monografii węzłów Lissajous.

2.4 Podsumowanie

Po latach mniejszego zainteresowania, synteza dźwięku staje się ponownie popularnym i interesującym tematem zarówno prac naukowych, jak i realizacji komercyjnych. Brakuje jednak nowych prac podejmujących się możliwie kompletnej prezentacji tego zagadnienia z punktu widzenia inżynierii dźwięku. Stało się to impulsem dla autora zarówno do opracowania nowych metod syntezy, jak również do uzupełnienia poświęconej im monografii o szerszy przegląd tematyki, obejmujący zarówno metody klasyczne, jak również te, które nie były prezentowane w starszych pracach.

Omawiana monografia przyczynia się do usystematyzowania wiedzy i ujednoczenia terminologii z zakresu syntezy dźwięku, pokazując aktualny stan rozwoju tego obszaru wiedzy i techniki. Praca przygotowana została przede wszystkim z myślą o inżynierach dźwięku, którzy podejmą się nie tylko wykorzystania istniejących syntezyzatorów, ale również

implementacji znanych metod w nowych narzędziach, a w końcu – opracowania nowych metod. Dlatego też omówione zostały nie tylko zasady na których oparto poszczególne techniki syntezy, ale również przedyskutowano różne aspekty ich implementacji.

Nowe, opracowane przez autora i opisane w monografii metody syntezy zostały zaprojektowane z myślą zarówno o zastosowaniach muzycznych – montaż frazy do reprodukcji zapisu nutowego, a nierealizowalne instrumenty do gry na żywo – jak i naukowych. Pierwsza – do badań psychoakustycznych, druga – dodatkowo do badań z zakresu sztuki. Jednocześnie zostały one przewidziane jako punkt wyjścia do dalszych poszukiwań, celem nadania impulsu i inspiracji pracom nad rozwojem istniejących i poszukiwaniem nowych technik. Forma i zawartość monografii powinny skłaniać do refleksji nad obecnym stanem całej gałęzi wiedzy, jaką jest synteza dźwięku, a w konsekwencji – do znalezienia nowych dróg dla jej rozwoju i – co nie mniej ważne – jej nowych zastosowań, naukowych i artystycznych.

3 Pozostałe osiągnięcia naukowo – badawcze

Zainteresowania naukowo-badawcze habilitanta obejmują tematykę związaną z inżynierią dźwięku, przetwarzaniem sygnałów oraz metodami, technikami i narzędziami komputerowymi w akustyce. Wiedzę i doświadczenie w wymienionych obszarach habilitant stosuje również w badaniach z zakresu psychoakustyki oraz muzycznych aspektów percepcji dźwięku. Dobór tematów jest efektem równoległej i stałej pracy w dwóch ośrodkach naukowych: w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie oraz w Instytucie Kompozycji, Dyrygentury i Teorii Muzyki Akademii Muzycznej w Krakowie. Najważniejsze, w ocenie autora, osiągnięcia w wymienionych obszarach zostały omówione poniżej.

3.1 Okres przed uzyskaniem stopnia doktora

Pierwsze prace badawcze, realizowane na początku studiów doktoranckich na AGH, dotyczyły słyszalności różnic między urządzeniami do reprodukcji dźwięku w warunkach studia nagrań. Zaowocowało to zdobyciem doświadczenia w zakresie inżynierii dźwięku, technik studyjnych i organizacji badań z udziałem dużych grup słuchaczy oraz wiedzą w zakresie metodologii tego typu badań. Efektem tych prac jest artykuł opublikowany w materiałach konferencyjnych Audio Engineering Society.

W ramach pracy w Akademii Muzycznej autor opracował i wdrożył komputerowy system do symulowania błędów intonacyjnych – pierwotnie zaprojektowany jako oryginalne i nowatorskie uzupełnienie dydaktyki dyrygentów, a następnie rozwinięty w narzędzie badawcze. Należy zaznaczyć, że Zespół ds. Kształcenia Słuchu Akademii Muzycznej w Krakowie, którego habilitant jest wieloletnim członkiem, był jednym z pionierów we wdrażaniu komputerowych narzędzi do kształcenia słuchu, w tym przede wszystkim narzędzi autorskich, obejmujących specjalizowane programy dla grup słuchaczy o bardzo wysokim stopniu kwalifikacji muzycznych.

Symulator synchronizuje dwie warstwy generowanego sygnału, łącząc wybrane cechy nagrań orkiestrowych z wysokiej jakości syntezatorem samplingowym. Nagranie pozwala na zachowanie wrażenia realizmu, natomiast syntezytor umożliwia kontrolowanie parametrów ścieżek wybranych instrumentów. Kontrola ta dotyczy w szczególności przestrojenia częstotliwości podstawowej dźwięku symulowanego instrumentu względem nagrania. Autor opracował szereg algorytmów i technik pozwalających na odwzorowanie w warstwie syntetycznej wybranych cech nagrania, np. obwiedni amplitudy, wartości częstotliwości podsta-

wowej, czy rytmu. Podstawową funkcją programu jest wprowadzanie odstrojeń zmieniających się w czasie w sposób charakterystyczny dla gry żywego muzyka, celem ich identyfikacji przez słuchacza. Dużą uwagę autor poświęcił opracowaniu intuicyjnego i efektywnego interfejsu użytkownika.

W efekcie opracowano i wdrożono nową, autorską metodę treningu słuchowego dla dyrygentów, którzy w ramach tradycyjnych zajęć z dwoma fortepianami nie mieli możliwości ćwiczenia problematyki intonacji. Według wiedzy autora, było to wówczas pierwsze takie narzędzie, a zarazem jeden z pierwszych zaawansowanych programów do komputerowego kształcenia słuchu wprowadzający do tej tematyki zagadnienia nowe, niemożliwe do realizacji bez wsparcia komputera, w czasie gdy standardem były programy odwzorowujące zagadnienia realizowane przez nauczyciela z fortepianem.

Na grupie odsłuchowej składającej się z muzyków, w tym dyrygentów, autor przeprowadził długoterminowe badania polegające na realizacji cyklu pracy, podczas którego rejestrowano wybrane aspekty interakcji słuchacza z symulatorem. Pierwszym celem tych badań była weryfikacja efektu pracy z programem, natomiast drugim – poszerzenie wiedzy na temat percepcji zjawisk intonacyjnych. Uzyskane wyniki stały się istotnym wkładem w opracowywaną pracę doktorską. Dzięki precyzyjnym pomiarom parametrów pracy słuchaczy autor wykazał występowanie dwóch oddzielnych trybów w jakich może być odbierane zjawisko błędu intonacyjnego. Rozprawa doktorska została wyróżniona, a autor w 2010 roku otrzymał Nagrodę Indywidualną II Stopnia Rektora Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie za osiągnięcia naukowe.

Wykorzystanie w symulatorze syntezy samplingowej, uznawanej wówczas za najlepszą w zakresie realistycznej reprodukcji dźwięku instrumentów akustycznych, ujawniło szereg jej wad i problemów. Stało się to dla autora impulsem do poszukiwań nowych metod, które później zaowocowały powstaniem monografii. Ponadto opracowane algorytmy synchronizacji stały się inspiracją dla niektórych rozwiązań zastosowanych w syntezie dźwięku metodą montażu frazy – technice opracowanej na potrzeby monografii.

3.2 Okres po uzyskaniu stopnia doktora

Pierwsza część prac naukowo-badawczych zrealizowanych po uzyskaniu stopnia doktora koncentruje się wokół projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju *Technologia selektywnego miksowania dźwięków* (NR16-0034-06). Miksowanie selektywne polega na usunięciu nakładających się na siebie obszarów reprezentacji czasowo-częstotliwościowej mieszanych sygnałów fonicznych celem poprawy wybranych aspektów percepcji uzyskanego w ten sposób materiału w porównaniu do miksu tradycyjnego. Ma ono zastosowania m.in. w przetwarzaniu sygnału mowy oraz muzyki. Opracowana w ramach projektu technologia jest skierowana do inżynierów dźwięku. Jako narzędzie pracy studyjnej pomaga osiągnąć lepszy efekt przy wykorzystaniu tych samych ścieżek dźwiękowych co w miksie tradycyjnym. Były również prowadzone pilotażowe badania nad jej implementacją dla celów poprawy zrozumiałości mowy przez osoby z ubytkami słuchu.

Jako członek zespołu projektowego habilitant realizował prace badawcze i implementacyjne. Badania w głównej mierze obejmowały generowanie, przetwarzanie i analizę sygnałów oraz testy odsłuchowe. W celu poprawy efektywności prac habilitant zaproponował, zaprojektował, zrealizował i zastosował w badaniach oprogramowanie automatyzujące różnorodne warianty procedur testowych, opartych m.in. o metodę dwualternatywnego wymuszonego wyboru lub o metody adaptacyjne. Pozwoliło to na prowadzenie badań z większymi grupami odsłuchowymi w znacznie krótszym czasie oraz wyeliminowało szereg potencjalnych błędów popełnianych przez operatora testów.

Testy miały na celu m.in. weryfikację doboru parametrów algorytmu odpowiednich do różnych zastosowań. Służyły także badaniu zjawisk stanowiących część procesu słyszenia, a związanych z problematyką dźwięków występujących jednocześnie. Habilitant był pomysłodawcą części tematów badawczych, np. dyskryminacji częstotliwości w dwutonie, czy modyfikacji struktury spektralnej przez usunięcie składowych powodujących dudnienia, a brał udział w realizacji zdecydowanej większości badań w ramach projektu. Zadaniem habilitanta było również przygotowywanie próbek dźwiękowych do testów i ich analiza oraz wizualizacja wybranych efektów. Wymagało to opracowania i implementacji szeregu algorytmów generowania, przetwarzania i analizy sygnałów.

Habilitant był odpowiedzialny za implementację kolejnych wariantów algorytmów selektywnego miksowania, za zwiększanie jego efektywności obliczeniowej, a także za implementację narzędzi do automatyzacji procesu generowania próbek do badań. Odpowiadał również za opracowanie dokumentacji algorytmów i programów, w tym za przygotowanie szczegółowych schematów blokowych.

Drugi nurt prac habilitanta koncentruje się wokół narzędzi komputerowych do badania wybranych aspektów percepcji dźwięku, w szczególności tych związanych z pracą inżyniera dźwięku oraz muzyka. Podobnie jak wcześniejszy program dla dyrygentów, narzędzia te są projektowane w taki sposób, aby obok funkcji badawczej mogły stanowić narzędzie do treningu wybranych aspektów słuchu. W ten sposób, trenując, słuchacze jednocześnie poznają nowe zjawiska z zakresu słyszenia. Stało się to popularnym modelem w grupach zaawansowanych studentów Inżynierii Akustycznej AGH oraz Kompozycji, Dyrygentury i Teorii Muzyki Akademii Muzycznej w Krakowie.

Model ten doskonale sprawdza się w przypadku tzw. solfeżu barwy. Habilitant zaprojektował i napisał program, który implementuje funkcjonalność realizowaną wcześniej przez drogą aparaturę laboratoryjną i rozszerza tę funkcjonalność o inne zagadnienia. Umożliwienie jednoczesnego badania lub treningu dużej grupy słuchaczy znacznie poprawia efektywność tych procesów. Zagadnienia realizowane przez program dzielą się na trzy grupy: filtracji pasmowej, parametrów generatorów sygnału oraz kompresji dynamiki. Autor opracował własne wersje niezbędnych algorytmów, takie jak generatory sygnału bez aliasingu, filtry o ściśle określonej charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej, czy kompresor o dobrze zdefiniowanych charakterystykach dynamicznych. Program wykorzystuje różnorodne, zależne od zagadnienia metody przeprowadzania testów. Ważną cechą jest praca w systemie rozproszonym opartym na modelu klient-serwer. Nieograniczona liczba terminali użytkowników raportuje ich działania przez sieć do centralnej bazy danych, do której dostęp mają operatorzy testu. Wstępna analiza wyników odbywa się z wykorzystaniem narzędzi bazodanowych.

Habilitant opracował i wdrożył więcej tego rodzaju narzędzi komputerowych, przy czym duża ich część dotyczy problematyki percepcji wysokości dźwięku w obszarach mikrotonowości, intonacji i systemów dźwiękowych. W programach tych istotnym problemem jest zagadnienie generowania sygnału o ściśle określonej obwiedni częstotliwości podstawowej przy zachowaniu niezbędnej złożoności struktury widmowej. Ważne jest powiązanie generowanych efektów ze zjawiskami zachodzącymi w instrumentach akustycznych, a dotyczącymi zarówno tych struktur drgających które bezpośrednio odpowiadają za powstanie dźwięku, jak również tych odpowiedzialnych za dalsze kształtowanie jego charakterystyk. Ciekawsze wyniki badań zostały przedstawione w szeregu publikacji.

W związku z szerokim zainteresowaniem tą tematyką autor był zapraszany do wygłoszenia dotyczących ich referatów (m.in. w ramach międzynarodowej konferencji *W Kręgu Dźwięku Akustycznego i Syntetycznego 2012* oraz seminariów *Studia Muzyki Elektroaku-*

stycznej AM) oraz do poprowadzenia warsztatów z narzędzi komputerowych dla osób zajmujących się dydaktyką słuchu.

Spośród pozostałych prac naukowo-badawczych za najważniejsze można uznać samodzielne napisanie wniosku o finansowanie projektu badawczego w ramach programu Opus do Narodowego Centrum Nauki. W projekcie tym, zatytułowanym *Osiągnięcie realizmu brzmieniowego w samplingowej syntezie dźwięku grupy dętej orkiestry symfonicznej* (nr 2012/05/B/HS2/03972) habilitant pełnił rolę głównego wykonawcy, realizując większość zadań, w tym wszystkie o charakterze naukowo-badawczym, takie jak projektowanie i przeprowadzanie eksperymentów, opracowywanie i implementacja algorytmów, czy analiza danych. Duża część wyników projektu, w tym opracowana w jego ramach metoda syntezy dźwięku, została opisana w monografii.

4 Podsumowanie działalności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej

Szczegółowy wykaz osiągnięć habilitanta został zamieszczony w dołączonym do wniosku załączniku nr 4: *Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki*. Poniżej zamieszczono jedynie krótkie podsumowania.

4.1 Działalność publikacyjna

Habilitant jest autorem bądź współautorem 67 publikacji, w tym 58 publikacji afiliowanych w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie i 9 – Akademii Muzycznej w Krakowie, na które składają się:

- 1 monografia habilitacyjna w języku angielskim,
- współautorstwo 2 monografii (po uzyskaniu stopnia doktora),
- 2 rozdziały w monografiach (po uzyskaniu stopnia doktora),
- 10 artykułów z listy JCR – baza Web of Science (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora),
- 8 artykułów w czasopismach naukowych spoza listy JCR, w tym 6 punktowanych, z listy B czasopism MNiSW (7 po uzyskaniu stopnia doktora, w tym 5 punktowanych),
- 14 artykułów w materiałach konferencyjnych, w tym 8 indeksowanych w bazie Scopus (9 po uzyskaniu stopnia doktora, w tym 7 w bazie Scopus),
- 30 innych publikacji, w tym 1 punktowana, z listy B czasopism MNiSW (27 po uzyskaniu stopnia doktora, w tym 1 punktowana).

20 spośród wymienionych publikacji jest punktowanych wg listy MNiSW (w tym 17 afiliowanych w AGH i 3 w AM). **Suma punktów MNiSW** dla wszystkich publikacji wynosi **252**, natomiast sumaryczny **Impact Factor: 6,066**. W czasie przygotowywania zestawienia punktacja MNiSW za rok 2019 dla monografii nie była jeszcze określona, dlatego monografia habilitacyjna nie została wliczona do sumy punktów.

Według baz Web of Science oraz Scopus **indeks Hirscha** habilitanta wynosi **2**, zaś według Google Scholar i Research Gate – **3**. Liczba cytowań dla publikacji z bazy Web of

Science wynosi 10, z bazy Scopus – 18, z bazy Google Scholar – 45, zaś z bazy Research-Gate – 36. W załączniku nr 6 przedstawiono wykaz cytowań wg. Web of Science z dnia 13.04.2019.

4.2 Udział w projektach

Przed uzyskaniem stopnia doktora habilitant uczestniczył w roli wykonawcy w międzynarodowym projekcie Unii Europejskiej Interreg III B CADSES, priorytet 1, CoUrbIT (4.4.130.748). Po uzyskaniu stopnia doktora brał udział w roli wykonawcy w projekcie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju *Technologia selektywnego miksowania dźwięków* (NR16-0034-06) oraz w roli głównego wykonawcy w projekcie badawczym Narodowego Centrum Nauki *Osiągnięcie realizmu brzmieniowego w samplingowej syntezie dźwięku grupy dętej orkiestry symfonicznej* (2012/05/B/HS2/03972).

Habilitant brał również udział w projekcie *Fabryka Inżynierów*, finansowanym w ramach IV Priorytetu Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki z Europejskiego Funduszu Społecznego, w ramach którego m.in. napisał podręcznik oraz komputerowy program dydaktyczny dla kierunku Inżynieria Akustyczna. Aktualnie bierze udział w projekcie współfinansowanym ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój – POWER (POWR.03.05.00-00-z307/17), w ramach którego opracował program nowego przedmiotu i uczestniczy w dostosowywaniu do projektu planu studiów na kierunku Inżynieria Akustyczna.

Od 2019 r. habilitant bierze udział w roli eksperta merytorycznego ds. badań oraz kierownika zespołu badawczego w projekcie *Prace badawczo rozwojowe nad przetwarzaniem dźwięku oraz tworzeniem kompozycji i nagrań muzycznych w oparciu o sztuczną inteligencję, w zintegrowanym systemie dystrybucji treści cyfrowych* realizowanym przez Independent Digital sp. z o.o. w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego na lata 2014–2020.

4.3 Udział w konferencjach naukowych

Habilitant wygłosił 8 referatów (w tym 6 po uzyskaniu stopnia doktora) na konferencjach międzynarodowych i 13 referatów (10 po uzyskaniu stopnia doktora) na konferencjach krajowych. 3 z referatów na konferencjach międzynarodowych były referatami zaproszonymi. Był również współautorem 11 referatów (10 po uzyskaniu stopnia doktora) wygłoszonych na konferencjach międzynarodowych i 6 (5 po uzyskaniu stopnia doktora) na konferencjach krajowych. Po uzyskaniu stopnia doktora habilitant siedmiokrotnie pełnił funkcję chairmana sekcji, w tym dwukrotnie na konferencjach międzynarodowych.

4.4 Działalność recenzencka i redakcyjna

W 2011 roku habilitant recenzował projekt Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

W 2019 roku recenzował artykuł nadesłany na 20th International Carpathian Control Conference – ICC’2019, Kraków – Wieliczka. W 2017 roku recenzował artykuł dla czasopisma Acta Physica Polonica A (lista A MNiSW) oraz 2 artykuły nadesłane na Ogólnopolską Studencką Konferencję Akustyków OSKA 2017, Kraków. W 2014 roku recenzował artykuły nadesłane na konferencję Forum Acusticum 2014, Kraków.

Habilitant był redaktorem czasopisma Acta Physica Polonica A (Lista A MNiSW), vol. 128 no. 1-A: Acoustical Engineering 2015.

4.5 Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych

Od 2010 roku habilitant jestem członkiem European Acoustics Association (EAA) oraz Polskiego Towarzystwa Akustycznego (PTA).

4.6 Staże naukowe

Habilitant nie odbył formalnego stażu, jednak od początku kariery zawodowej (2004) obok głównego miejsca pracy – Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH – jest dodatkowo zatrudniony na Wydziale Twórczości, Interpretacji i Edukacji Muzycznej Akademii Muzycznej w Krakowie: od roku 2004 w ramach umów o dzieło (prowadzenie wykładów), od 2008 – na stanowisku asystenta, a od 2009 – na stanowisku adiunkta. W ramach tej pracy zajmuje się zagadnieniami z zakresu akustyki muzycznej, syntezy dźwięku i kształcenia słuchu.

4.7 Działalność organizacyjna

Habilitant:

- od 2013 r. jest członkiem Wydziałowego Zespołu ds. Jakości Kształcenia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH,
- od 2007 r. jest członkiem Zespołu ds. Kształcenia Słuchu w Akademii Muzycznej w Krakowie,
- od 2012 r. bierze aktywny udział we wdrażaniu Krajowych Ram Kwalifikacji, a następnie Polskiej Ramy Kwalifikacji dla kierunku *Inżynieria Akustyczna* (AGH),
- od 2008 bierze aktywny udział w opracowaniu i stały udział w aktualizacjach programu dla studiów I i II stopnia na kierunku *Inżynieria Akustyczna* na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH,
- od 2012 roku jest administratorem systemu Syllabus oraz sprawuje opiekę techniczną nad planami studiów kierunku *Inżynieria Akustyczna* (AGH),
- jest autorem projektu oraz opiekunem technicznym pracowni komputerowej w ramach laboratorium inżynierii dźwięku – sala 313/D-1 (AGH),
- od 10.2008 do 06.2009 opracował i wdrożył oprogramowanie komputerowe dla celów internetowej oceny kadry dydaktycznej przez studentów Akademii Muzycznej w Krakowie,
- bierze udział w eksperckich grupach odsłuchowych w ramach szeregu prac badawczych prowadzonych w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH.

Był członkiem komitetu organizacyjnego 9 konferencji, w tym 3 międzynarodowych. Pełnił funkcję zastępcy przewodniczącego komitetu organizacyjnego międzynarodowej konferencji (ISSET 2013). Od 2013 r. organizuje konkurs prac studenckich i sekcję studencką, a od 2018 r. także sekcję *Akustyka i muzyka* na konferencjach Inżynierii Akustycznej i Biomedycznej.

4.8 Działalność dydaktyczna

Habilitant jest promotorem pomocniczym pracy doktorskiej (w trakcie realizacji) mgr inż. Daniela Tokarczyka na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH.

Był promotorem 12 obronionych prac magisterskich, w tym 11 na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH oraz 1 na Wydziale Twórczości, Interpretacji i Edukacji Muzycznej Akademii Muzycznej w Krakowie. Był promotorem 35 obronionych prac inżynierskich na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH oraz 1 na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH. Aktualnie (semestr letni roku 2018/2019) habilitant jest opiekunem 4 prac magisterskich.

Habilitant bierze aktywny udział w jury konkursów studenckich. Od 2018 r. jest przewodniczącym Jury Konkursu Prac Studenckich w ramach Konferencji Inżynierii Akustycznej i Biomedycznej. Od 2009 r. jest członkiem komisji podczas Sesji Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego, a w 2009 r. był członkiem komisji podczas Sesji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego.

Był założycielem i wieloletnim opiekunem (2008 – 2015) Koła Naukowego Inżynierii Akustycznej AGH. W ramach opieki nad KN i poza nią był opiekunem licznych prac studenckich, z których wiele zajęło I (4 prace), II (4 prace) lub III miejsca (3 prace) w sekcjach Studenckich Sesji Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH. Jedna z prac zajęła III miejsce w Konkursie Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Akustycznego na najlepszy referat w ramach Ogólnopolskiej Konferencji Studenckiej Akustyków OSKA 2019, zaś inna – III miejsce w Konkursie im. Władysława Bogusza w ramach Konferencji IAB 2011. Tegoroczny dyplomant habilitanta jest laureatem X Edycji Konkursu na Najlepsze Prace Dyplomowe Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH.

Habilitant jest autorem recenzowanego podręcznika dla studentów kierunku Inżynieria Akustyczna, wydanego przez Wydawnictwa AGH w 2012 r. Konsultował również skrypt o języku angielskiego dla studentów tego samego kierunku, autorstwa Anny Hardek i Magdaleny Dańko, wydany przez Wydawnictwa AGH w 2016 r.

Jest samodzielnym autorem programu 13 przedmiotów (4 na Akademii Muzycznej w Krakowie, pozostałych na AGH), z czego 8 programów obejmowało wykłady i ćwiczenia laboratoryjne, 4 – ćwiczenia bądź ćwiczenia laboratoryjne, a 1 – same wykłady. Jest także współautorem programu 6 przedmiotów (na AGH), z czego 4 obejmowało wykłady i ćwiczenia laboratoryjne, a 2 same wykłady (1 w języku angielskim). Ponadto prowadził zajęcia z 8 innych przedmiotów (3 w języku angielskim).

4.9 Nagrody i wyróżnienia

Habilitant otrzymał trzy nagrody. W 2010 roku – nagrodę indywidualną II stopnia Rektora Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie za osiągnięcia naukowe. W 2014 roku – nagrodę zespołową II stopnia Rektora Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie za osiągnięcia dydaktyczne. W 2017 roku został (ze współautorami) laureatem I miejsca w ramach konkursu na najlepszy plakat na konferencji VII International Congress on Combustion Engines (27–29 czerwca 2017, Poznań).

4.10 Zbiorcze zestawienie dorobku naukowo-badawczego

Poniższa tabela zawiera zbiorcze zestawienie informacji obejmujących dorobek naukowo-badawczy habilitanta.

DOROBEK NAUKOWO-BADAWCZY			PRZED DOKTORATEM	PO DOKTORACIE	RAZEM
PUBLIKACJE					
Rodzaj publikacji	Punktacja MNiSW	Impact Factor			
Artykuły z listy JCR (wg. Web of Science)	135 (AGH) ² 15 (AM)	5,149 (AGH) 0,917 (AM)	0	9 (AGH) 1 (AM)	10
Pozostałe artykuły w czasopi- smach naukowych	33 (AGH) 2 (AM)	0,0	1 (AGH) 0 (AM)	4 (AGH) 3 (AM)	8
Artykuły w materiałach konferencyjnych indeksowa- ne w bazie Scopus	0	0,0	0 (AGH) 1 (AM)	6 (AGH) 1 (AM)	8
Pozostałe artykuły w mate- riałach konferencyjnych	0	0,0	4 (AGH) 0 (AM)	1 (AGH) 1 (AM)	6
Monografie (autorskie)	0 ³	0,0	0	1 (AGH)	1
Monografie (współautor)	45 (AGH)	0,0	0	2 (AGH)	2
Rozdziały monografii	9 (AM)	0,0	0	2 (AM)	2
Pozostałe	13 (AGH) 0 (AM)	0,0	3 (AGH) 0 (AM)	27 (AGH) 0 (AM)	30
Razem	252	6,066	8 (AGH) 1 (AM)	50 (AGH) 8 (AM)	67
UDZIAŁ W KONFERENCJACH					
Konferencje międzynarodowe	Referaty wygłoszone		2	6	8
	W tym referaty zaproszone		0	3	3
	Współautor referatu		1	10	11
	Chairman sekcji		0	2	2
Konferencje krajowe	Referaty wygłoszone		3	10	13
	Współautor referatu		1	5	6
	Chairman sekcji		0	5	5
UDZIAŁ W PROJEKTACH					
NCN			0	1	1
NCBiR			0	1	1
Międzynarodowe			1	0	1
Inne			0	3	3
INNA DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA					
Recenzje projektów			0	1	1
Recenzje artykułów z listy JCR			0	1	1
Recenzje innych artykułów			0	4	4
Redakcja czasopisma			0	1	1

²W nawiasie podano afiliację: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie (AGH) lub Akademia Muzyczna w Krakowie (AM).

³W czasie przygotowywania zestawienia punktacja MNiSW za rok 2019 dla monografii nie była jeszcze określona, dlatego monografia habilitacyjna nie została wliczona do sumy punktów.

W tabeli poniżej zebrano informacje dotyczące wskaźników oceny dorobku naukowego habilitanta według czterech różnych baz publikacji.

WSKAŹNIKI OCENY DOROBKU NAUKOWEGO		
Web of Science	Indeks Hirscha	2
	Liczba cytowań publikacji	10
Scopus	Indeks Hirscha	2
	Liczba cytowań publikacji	18
Google Scholar	Indeks Hirscha	3
	Liczba cytowań publikacji	45
ResearchGate	Indeks Hirscha	3
	Liczba cytowań publikacji	36
	RG Score	12,20