

AUTOREFERAT

(lista publikacji w załączniku)

Moje zainteresowania badawcze dotyczą tematyki z zakresu cyfrowego przetwarzania sygnałów zwłaszcza w zastosowaniu do badań nieniszczących wykonywanych przy wykorzystaniu ultradźwięków oraz prądów wirowych. Główna część mojej aktywności naukowej koncentruje się wokół metod wykorzystujących sprężyste fale ultradźwiękowe oraz fale elektromagnetyczne do wykrywania nieciągłości w ciałach stałych (głównie materiałach metalicznych). Większość moich prac ma charakter aplikacyjny a ich podstawowym celem było stworzenie algorytmów przetwarzania sygnałów, które umożliwiają wykrycie wad materiałowych i uszkodzeń z podwyższoną czułością i rozdzielczością. Pewna część prac jest poświęcona wykorzystaniu ultradźwięków do nieniszczącego charakteryzowania własności materiałów, zwłaszcza stali i miedzi.

W ramach dotychczasowej działalności naukowo-badawczej opublikowałem ponad 170 prac, w tym 51 artykułów w zagranicznych czasopismach recenzowanych i 117 prac w materiałach międzynarodowych konferencji. Po uzyskaniu stopnia doktora habilitowanego w AGH opublikowałem 9 artykułów w czasopismach posiadających *impact factor* (PA1-PA9) oraz 17 w materiałach konferencyjnych (CA1-CA17). Większa część mojego dorobku powstała w okresie gdy pracowałem w Uppsala University będąc promotorem czterech doktorów i sześciu licencjatów, którzy byli moimi kolejnymi współautorami. Prace z tego okresu są jednak spójne i dotyczą szeroko pojętej cyfrowej obróbki sygnałów uzyskiwanych podczas ultradźwiękowych testów przeprowadzanych w energetyce jądrowej. Duża część prac, które były wykonywana w ramach projektu finansowanego przez szwedzką firmę SKB (*the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management firmą Co.*) jest przedstawiona w sześciotomowej monograficznej serii raportów, których byłem głównym autorem i edytorem (M1). Raporty SKB były wydawane w postaci drukowanej i są dostępne w internetowej bazie danych SKB¹. Prace wykonane po uzyskaniu stopnia doktora habilitowanego w ramach projektu MONIT w AGH zostały zebrane w książce wydanej przez Wiley & Sons Co w języku angielskim, która ostatnio została przetłumaczona na j. chiński (K1).

Karierę naukową rozpocząłem w we wrześniu 1974 roku w Instytucie Automatyki Przemysłowej na Wydz. Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej, gdzie zostałem zatrudniony jako asystent. W początkowym okresie pracy w Inst. Automatyki zajmowałem się zagadnieniami związanymi z dwupołożeniową regulacją temperatury pod kierunkiem prof. Stanisława Skoczowskiego. Prace dotyczyły modelowania obiektów cieplnych z uwzględnieniem nieliniowości dynamicznych oraz projektowania nowych regulatorów nieliniowych z korekcją dynamiczną we współpracy z OBR Lumel w Zielonej Górze. Rezultaty zostały opublikowane w czasopismach (P1-P3) oraz w materiałach konferencyjnych (C1-C3). Za te prace uzyskałem dwukrotnie, wspólnie z kolegami, zespołowe nagrody Ministra MSWiT w latach 1976 i 1981.

Pod koniec lat 70-tych zdecydowałem się zmienić tematykę badań naukowych i zająłem się identyfikacją systemów oraz cyfrowym przetwarzaniem sygnałów. Rozpocząłem współpracę z prof. Władysławem Jarominkiem i pod jego opieką w maju 1983 roku obroniłem na Wydz. Elektrycznym, Politechniki Warszawskiej pracę doktorską pt. „Filtracja przy użyciu zmodyfikowanych filtrów Kalmana w układach z niepełną informacją o zakłóceniach”. Moja rozprawa dotyczyła zagadnień związanych z estymacją stanu liniowych układów dynamicznych przy niepełnej informacji o rozkładzie prawdopodobieństwa zakłóceń. Opracowałem algorytmy

¹ http://www.skb.com/publications/?publication_search=stepinski&type&language&start_year&end_year

typu *robust*, które nie wymagały dokładnej znajomości rozkładu prawdopodobieństwa zakłóceń. Estymatory były oparte na założeniu, że rozkłady zakłóceń należą do klasy rozkładów e-normalnych charakteryzujących się tzw. „podniesionymi ogonami” (*heavy tails*). Algorytmy te testowałem przy zastosowaniu symulacji w języku Fortran dla modelu samolotu *fly-by-wire*; rezultaty zostały przedstawione na kilku konferencjach międzynarodowych (C4 – C7).

W marcu 1984 roku wyjechałem na roczny staż naukowo-przemysłowy na zaproszenie firmy Sandvik Bergstrand AB, położonej w środkowej Szwecji. Pracowałem w tej firmie do końca czerwca 1988r, najpierw jako konstruktor układów elektroniki z wykorzystaniem procesorów sygnałowych (2920 produkcji Intela), a następnie jako odpowiedzialny za R&D. Brałem czynny udział w opracowaniu urządzeń do automatycznej kontroli jakości wyrobów przemysłu stalowniczego (głównie rur i prętów stalowych) metodą prądów wirowych. Główny problem polegał na klasyfikacji defektów na podstawie ich charakterystyki amplitudowo-fazowej na płaszczyźnie zespolonej (sygnały podobne do krzywych Lissajous). Prowadziłem badania w ramach projektu dotyczącego wykrywania wad materiałowych w gorących słabach stalowych w procesie ciągłego odlewania stali przy pomocy wirujących dysków zawierających, chłodzone wodą, czujniki wiroprowadowe. Nasze urządzenia były testowane w warunkach przemysłowych w liniach odlewania firmy SSAB Luleå. W efekcie tych badań powstał artykuł P4 oraz referaty konferencyjne C8-13 oraz C27.

W sierpniu 1988r, po formalnym uznaniu mojego polskiego dyplomu doktora, rozpocząłem pracę na Wydz. Technologii, Uppsala University (UU), na stanowisku pracownika badawczego (*postdoctoral assistant*). W początkowym okresie mojej pracy w UU kontynuowałem tematykę badań nieniszczących związaną z analizą i klasyfikacją sygnałów w instrumentach wiroprowadowych, rezultaty zostały opublikowane w artykułach P4, P8 i P10 oraz przed-stawione w materiałach konferencyjnych C14-18, C24 i C27.

Na początku lat 90 nawiązałem współpracę ze szwedzką energetyką jądrową i uzyskałem finansowanie kilku projektów z organu nadzorującego elektrownie jądrowe, SKI (Szwedzka Inspekcja Jądrowa). Moją dziedziną były nadal badania nieniszczące ale zająłem się metodami analizy sygnałów ultradźwiękowych generowanych podczas badania obiektów wykonanych ze stali stopowych (reaktory) oraz, w okresie późniejszym, miedzi (pojemniki na zużyte paliwo jądrowe).

Pierwsze projekty dotyczyły metod filtracji (liniowych i nieliniowych) mających na celu wy tłumienie sygnałów rozpraszanych przez ziarnistą strukturę badanego materiału (głównie stali austenitycznych), tzw. *grain noise*. Szum tego typu jest sygnałem stacjonarnym, a więc nie można go wytłumić poprzez uśrednianie w czasie. Poziom sygnału (echa od większego reflektora) do tego szumu można poprawić przez uśrednianie przestrzenne zmieniając położenie głowicy lub przy pomocy nieliniowej kombinacji filtrów wąskopasmowych (*SSP-split spectrum methods*). W ramach projektu EU SPIQNAR opracowałem w 2001 roku, wspólnie z moimi współpracownikami, *Ultrasonic Processing Toolbox* w Matlabie zawierający funkcje implementujące szereg metod SSP opartych na podziale widma sygnału odebranego przez głowicę ultradźwiękową.

W 1994 roku uzyskałem stopień naukowy docenta w specjalności elektronika w Uppsala University (szwedzki odpowiednik polskiego stopnia doktora habilitowanego). Stopień docenta umożliwił mi występowanie jak formalny promotor przewodów doktorskich w UU. W roku 1995 wypromowałem pierwszego doktora, był nim doktor Mats Gustafsson (od kilku lat profesor UU), który w swej pracy dokonał kompleksowej analizy teoretycznej metody SSP. Wyniki tych badań publikowaliśmy głównie w materiałach konferencyjnych (C19-C23 oraz C25-C26 i C28), a także w artykułach P5-P7 i P9.

W roku 1994 rozpocząłem współpracę z firmą SKB (*the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management firmą Co.*), która zajmuje się opracowaniem technologii docelowego przechowywania odpadów radioaktywnych pochodzących z elektrowni jądrowych, głównie zużytych prętów paliwowych. W ramach tej współpracy, która trwała bez przerwy do roku 2011,

zajmowaliśmy się metodami kontroli spoin w kanistrach miedzianych przeznaczonych do przechowywania prętów paliwowych. Kanistry miedziane w postaci cylindrów o wysokości ok 5m i średnicy ponad 1m mają być umieszczone w specjalnym depozytorium budowanym w tej chwili na dużej głębokości pod ziemią (w szwedzkiej skale granitowej). Kanistry te, po napełnieniu prętami, muszą być absolutnie szczelne aby nie dopuścić do kontaktu paliwa z wodą głębinową. Okres gwarancji, wynikający z czasu rozpadu paliwa wynosi co najmniej 100 tys. lat. Spawy wykonywano w pierwszym okresie metodą spawania wiązką elektronową (EB – *electron beam welding*) a później metodą zgrzewania tarcowego z przemieszaniem (ang. *stir friction welding*).

Zaproponowałem i opracowałem w moim zespole metodę kontroli spawów przy pomocy techniki ultradźwiękowej z zastosowaniem sfazowanych głowic wieloelementowych (PA – *phased arrays*). W drugiej połowie lat 90-tych mieliśmy w naszym laboratorium jedyny w Szwecji wielokanałowy system PA, którego używaliśmy do badań eksperymentalnych prowadzonych na rzeczywistych próbkach kanistrów przy pomocy ultradźwiękowych głowic sfazowanych metodą zanurzeniową. Próbkę umieszczaliśmy w specjalnym tanku z wodą a głowice były prowadzone precyzyjnym skanerem XY co umożliwiało rejestrację trójwymiarowych sygnałów RF potrzebnych do stworzenia prezentacji typu B- i C-scan. Przed wygenerowaniem B- i C-scanów zarejestrowane sygnały ultradźwiękowe RF były odpowiednio filtrowane.

W drugiej połowie lat 90-tych stworzyłem na Wydz. Technologii UU zespół badawczy badań nieniszczących, w skład którego, oprócz doktorantów, wchodził, przebywający wtedy w Szwecji, prof. Rymantas Kazys z Kowna² oraz doktor Ping Wu (który do dziś pracuje w UU).

Moim nadrzędnym celem w tym czasie było rozwiązanie dwóch podstawowych problemów związanych obrazowaniem defektów w spoinach, mianowicie, poprawy stosunku sygnału do szumu oraz poprawy rozdzielczości (zarówno *spatial* jak i *range resolution*). Szum obserwowany w sygnałach ultradźwiękowych pochodził od rozproszenia fal ultradźwiękowych na gruboziarnistej strukturze miedzi powstającej w obszarze spoiny w na skutek stapiania miedzi w procesie spawania EB. Staraliśmy się ograniczyć poziom tego szumu (poprawić SNR) przez zastosowanie algorytmów SSP oraz lokalnego uśredniania sygnałów pochodzących od kilku ech (A-scanów); C40, C51, C56.

Poprawa SNR oraz rozdzielczości kątowej (*spatial resolution*) była uzyskiwana przez zastosowanie zogniskowanych elektronicznie, wieloelementowych głowic sfazowanych. Używaliśmy głowic linowych zanurzeniowych o 32 i 64 elementach i częstotliwości 3.5 MHz, zogniskowanych geometrycznie w jednym wymiarze na głębokości odpowiadającej położeniu spoiny (60 mm, co po uwzględnieniu słupa wody dawało nominalną odległość ogniskową 180 mm). Przeprowadziliśmy szereg badań eksperymentalnych różnych próbek kanistrów ze sztucznymi defektami (wierconymi otworami). Wyniki eksperymentalne dotyczące wykrywania i obrazowania defektów w spoinach wykonanych metodą EB prezentowałem na wielu konferencjach międzynarodowych: C37, C41, C42, C45, C46, C47, C50, C53, C55, C59.

Optymalizacja warunków testu (*focusing law*) wymagała narzędzi do symulacji fal ultradźwiękowych w warunkach zanurzenia. W tym celu opracowaliśmy rozwiązanie teoretyczne wykorzystujące metodę widma kątowego (*angular spectrum*) w wodzie, która generowała aperturę umożliwiającą uwzględnienie zjawiska ugięcia fal przy przejściu z wody do ciała stałego. Wynikiem tych prac było oprogramowanie w języku C++, które umożliwiło optymalizację ogniskowania. Wyniki teoretyczne opublikowaliśmy w artykułach: P11-P13, P16-P17, P19-P20, P28 oraz w materiałach konferencyjnych: C30, C33, C43, C44, C55, C57. Wyniki naszych badań były także publikowane w dorocznych raportach, dostępnych na stronach internetowych SKB.

² https://www.researchgate.net/profile/Rymantas_Kazys

Dla ustalenia progu czułości badania ultradźwiękowego konieczna była znajomość własności badanego materiału, przede wszystkim wielkości ziarna wpływającego na poziom szumu pochodzącego od struktury oraz tłumienia fal. Przeprowadziliśmy szereg badań dotyczących tego zjawiska, których wyniki opublikowano w artykule P24 oraz C41, C45-C46.

Poprawa rozdzielczości obrazowania w dziedzinie czasu (*range resolution*) wymagała efektywnej metody rozplatania odpowiedzi impulsowej głowicy ultradźwiękowej w uzyskanym sygnale ultradźwiękowym. Zagadnienie to badałem wspólnie z moim drugim doktorantem, doktorem Tomaszem Olofssonem, który obronił swą pracę w grudniu 2000 roku. Badaliśmy efektywność różnych algorytmów rozplatania sygnałów wykorzystujących podejście stochastyczne (*maximum a posteriori* oraz *maximum entropy*), a także genetyczne algorytmy optymalizacji; wyniki zostały opublikowane w P21, P25 i P26 oraz na konferencji w Quebec (C58).

Prowadziłem też prace polegające na zastosowaniu, znanych z medycyny, metod obrazowania harmonicznego (*harmonic imaging*) opartej na zjawiskach nieliniowych, do detekcji defektów w spoinach kanistrów, których wyniki przedstawiono w C48, C52 i C54.

Równocześnie kontynuowane były prace dotyczące metod do automatycznej klasyfikacji wad materiałowych położonych pod powierzchnią przy pomocy defektoskopii wiroprowodowej, która z racji na ograniczenia penetracji spowodowane zjawiskiem naskórkowości (*skin effect*) wymagała zastosowania specjalnych czujników pracujących na niskich częstotliwościach rzędu kilku kHz; P22, C49, C61, C62.

Jednym z najważniejszych osiągnięć w ramach projektu SKB było stworzenie podstaw teoretycznych metody apertury syntetycznej w zastosowaniu do badań ultradźwiękowych w zanurzeniu. Metoda apertury syntetycznej, stosowana głównie do fal elektromagnetycznych, działa w oparciu o założenie, że źródła są umieszczonymi w polu dalekim, punktowymi antenami, których wymiar jest o wiele mniejszy od długości fali. W praktycznych zastosowaniach ultradźwiękowych warunek ten często nie jest spełniony bo obszar, który jest obrazowany, znajduje się stosunkowo blisko głowicy lub elementów głowicy mozaikowej, które emitują i odbierają fale. W związku z tym założenie, że źródło emituje falę sferyczną nie jest spełnione i trzeba uwzględnić charakterystykę przestrzenną zarówno elementu emitującego jak i elementu odbierającego fale. Odpowiedź impulsowa rzeczywistej apertury o skończonych wymiarach jest zależna od punktu w przestrzeni, gdzie dokonuje się pomiaru. Ta zależność jest zwykle przedstawiana dla wybranej liczby falowej w dziedzinie częstotliwości jako charakterystyka kierunkowa z charakterystycznym listkiem głównym i listkami bocznymi. Charakterystyki kierunkowe są zwykle analizowane przy założeniu sygnału wąskopasmowego i nie uwidoczniają zmian dla zależnych od częstotliwości.

Wspólnie z moim kolejnym doktorantem F. Lingvallem, który obronił pracę w 2004 roku, opracowaliśmy model obrazowania przy pomocy apertury syntetycznej w dziedzinie czasu i przestrzeni oparty na splocie charakterystyki elektrycznej oraz odpowiedzi czasowo-przestrzennej apertury o skończonych wymiarach. Pokazaliśmy tym samym, że rzeczywista apertura źródła użytego do apertury syntetycznej jest filtrem czasowo-przestrzennym modyfikującym sygnał elektryczny użyty do pobudzania głowicy, P29.

Następnie opracowaliśmy dyskretny w czasie i przestrzeni model obrazowania przy użyciu apertury syntetycznej, uwzględniający efekty dyfrakcyjne wywołane skończonym wymiarem sensorów użytych do emisji i odbioru sygnałów ultradźwiękowych oraz zaproponowaliśmy metodę ich rozplatania; P29 i P33. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowałem algorytmu apertury syntetycznej i metody kompensacji efektów dyfrakcji w dziedzinie częstotliwości; wyniki przedstawiono w artykule P32 i P33 oraz C69, C71. Zagadnienia związane z efektywnością apertury syntetycznej dla materiałów ze strukturą ziarnistą przedstawiono w materiałach konferencyjnych C81, C85, C87, C89.

Aby ominąć problemy związane z dyfrakcją głowic o skończonych wymiarach w zastosowaniach do apertury syntetycznej zaproponowałem metodę wirtualnego źródła (*virtual source*) polegającą na użyciu silnie zogniskowanej głowicy jako źródła fal akustycznych w jej

polu dalekim. W metodzie tej traktuje się wirtualne źródło fal położone w ognisku głowicy zogniskowanej jako źródło użyte w algorytmie apertury syntetycznej. Uzyskuje się w ten sposób źródło o szerokim listku głównym czyli o własnościach zbliżonych do źródeł punktowych. Przeprowadziliśmy symulacje pola emitowanego przez wirtualne źródła i zaproponowaliśmy metodę rozplatania jego charakterystyki dyfrakcyjnej; P36. W późniejszym okresie wykorzystaliśmy to podejście do obrazowania defektów w blokach metalowych; P43.

Analiza zjawisk czasowo-przestrzennych związanych z aperturą syntetyczną wymagała narzędzia do modelowania propagacji fal akustycznych. We współpracy z prof. Bogdanem Piwakowskim z Ecole Centrale de Lille, stworzyliśmy toolbox DREAM przeznaczony do modelowania propagacji fal akustycznych emitowanych przez różnego typu apertury. Prof. Piwakowski stworzył w latach 90-tych podstawy teoretyczne tego oprogramowania w Fortranie, a u nas został on zaimplementowany w C++ oraz w Matlabie i uzupełniony dużą ilością funkcji oraz przykładów. Dr F. Lingvall napisał obszerny manual DREAMa oraz stworzył możliwość jego realizacji na różnych platformach. DREAM jest dostępny na stronie internetowej Zakładu Signals and Systems, UU w którym pracowałem³ a dr F. Lingvall nadal zajmuje się jego serwisem.

Wyniki naszych badań związanych z projektem SKB dotyczące badań nieniszczących kanistrów miedzianych do docelowego składowania zużytego paliwa nuklearnego były publikowane w dorocznych raportach, dostępnych na stronach internetowych SKB; najważniejsze z tych wyników zostały opublikowane w 6-cio tomowej monografii M1, której byłem autorem i edytorem.

Oprócz prac wykonywanych na potrzeby SKB, kierowałem szwedzkimi projektami krajowymi oraz byłem kierownikiem zadań w pięciu projektach europejskich (BriteEuram oraz 5th Framework).

Projekty te dotyczyły badania konstrukcji lotniczych (ultradźwiękowej spektroskopii rezonansowej oraz badania elementów wirujących silników metodami elektromagnetycznymi). Rezonansowa spektroskopia ultradźwiękowa (*RUS – resonance ultrasound spectroscopy*) polega na zarejestrowaniu w trakcie eksperymentu widma mechanicznego badanego obiektu (zwykle o niewielkich wymiarach) w paśmie kilkudziesięciu do kilkuset kHz. Widmo to zawiera istotną informację odnośnie poszczególnych postaci drgań badanego obiektu. Jeśli eksperyment jest przeprowadzony dla pewnej liczby obiektów o identycznej geometrii można na jego podstawie wykryć zmiany wywołane zarówno pojawieniem się defektów, jak też zmianą własności materiałowych badanych obiektów. Test RUS jest zaliczany do metod globalnych bo wrażliwość tej metody na defekty jest stosunkowo ograniczona. Metoda została stworzona w *Los Alamos National Labs, USA* do pomiaru stałych materiałowych materiałów anizotropowych. Realizacja eksperymentu jest stosunkowo prosta, wykonywaliśmy go przy pomocy specjalnie skonstruowanych głowic piezoelektrycznych oraz analizatora sieci (*network analyzer*) mierzącego współczynniki odbicia (*reflection coefficients*) czwórników elektrycznych. Jednak analiza widm eksperymentalnych jest zwykle skomplikowana i wymaga zastosowania narzędzi sztucznej inteligencji; P23 i C36. W ramach projektów europejskich zastosowaliśmy wariant tej metody do badania warstwowych struktur klejonych w przemyśle lotniczym (C65, C68, C70 i C80) oraz struktur kompozytowych C79 i C80.

We współpracy z Automotive Center University of Warwick, UK, zastosowałem jedną z odmian tej metody do kontroli nitów stosowanych do łączenia blach aluminiowych w przemyśle samochodowym (*self-piercing rivets*); C77 oraz zgłoszenie patentowe PP1 i PP2.

Po zakończeniu projektu finansowanego przez SKB w 2011 roku rozpocząłem współpracę ze szwedzkim przemysłem stalowniczym w ramach projektów finansowanych przez Jernkontoret (*The Swedish Steel Producer's Association*). Moje badania dotyczyły głównie nieniszczących metod służących do charakteryzacji stali opartych o własności fal ultradźwiękowych, a więc pomiarze prędkości fal poprzecznych przy pomocy głowic elektromagnetycznych (EMAT) oraz

³ <http://www.signal.uu.se/Toolbox/dream/>

rezonansowej spektroskopii ultradźwiękowej. Wykazano, że twardość blach walcowanych ze stali martenzytycznej może być oceniona na podstawie pomiaru prędkości fali poprzecznej wzbudzonej i odbieranej przy pomocy głowicy EMAT, nawet jeśli skład chemiczny stali nie jest dokładnie znany; P40.

Badałem także możliwość zastosowania RUS do oceny twardości własności wyrobów stalowych (pierścieni łożysk tocznych) oraz badania jakości spoiny lutowanej w wiertłach z lutowaną końcówką z węglika spiekanego. Wykazano, że RUS może być użyty do oceny twardości pierścieni ze stali stopowej poddawanych obróbce cieplnej; P41, C94. We współpracy z Politechniką Gdańską, metoda RUS została też z powodzeniem zastosowana w moim laboratorium do pomiarów własności warystorów; P37.

Pod koniec pierwszej dekady nowego tysiąclecia moje zainteresowanie wzbudziło monitorowanie stanu struktur mechanicznych (SHM – *structural health monitoring*), w szczególności zastosowanie fal płytowych (fal Lamba) do monitorowania stanu struktur lotniczych wykonanych z aluminium i kompozytów z włókna węglowego (CFRP). SHM jest pod wieloma względami naturalną drogą rozwoju badań nieniszczących i interesującym obszarem badawczym.

Zaproponowałem użycie wieloelementowych głowic płaskich o regularnej strukturze 2D do obrazowania nieciągłości przy pomocy fal Lamba. Pierwsze prace dotyczyły zastosowania, znanych z radiokomunikacji regularnych matryc kołowych (*uniform circular matrices*) do estymacji kierunku z jakiego propagują fale Lamba. Zaletą tych matryc jest możliwość ich przekształcenia przy pomocy transformacji Butlera w wirtualne matryce liniowe w celu modyfikowania charakterystyki kierunkowej przy pomocy klasycznych metod apodyzacji (doboru współczynników wagowych przy zastosowaniu okien używanych do estymacji widmowej i projektowania filtrów cyfrowych). Wyniki symulacji i eksperymentów przedstawiono w P38, C82-C84.

Następne prace dotyczyły metod adaptacyjnych estymacji widmowej w zastosowaniu do znajdowania kierunku propagacji padającej fali Lamba przy pomocy matryc o geometrii prostokątnej. Badano efektywność estymatora Capona oraz algorytmu MUSIC (*multiple signal classification*) zastosowanych do estymacji kierunku propagacji i tłumienia wybranej postaci (symetrycznej lub asymetrycznej) fali Lamba. W opublikowanych pracach przedstawiono zarówno wyniki symulacji procesu propagacji fal Lamba z uwzględnieniem ich dyspersyjnego charakteru jak i eksperymentalne wyniki obrazowania uzyskane na płycie aluminiowej ze sztucznymi defektami w formie różnej wielkości otworów; P39, P42, C86, C88, C90. Wykazano, że matryca dwuwymiarowa daje możliwość uzyskania jednoznacznego obrazu nieciągłości i dodatkowo stwarza możliwość filtracji w dziedzinie liczby falowej. Prace te były wykonane wspólnie moim ostatnim uppsalskim doktorantem, doktorem Marcusem Engholmem, który obronił swój doktorat w 2010 roku.

W tym czasie nawiązałem ścisłą współpracę z Katedrą Robotyki i Mechatroniki, AGH w Krakowie, którą odwiedzałem jako profesor wizytujący, prowadzący wykłady z teorii sygnałów. W ramach tej współpracy brałem udział w projekcie MONIT dotyczącym systemów monitorowania konstrukcji (SHM). W ramach tego projektu byłem wspólnie z prof. T. Uhlem promotorem doktora Łukasza Ambrozińskiego, który kontynuował tematykę rozpoczętą przeze mnie w Uppsali w dziedzinie obrazowania defektów w płytach przy pomocy fal Lamba. Zaproponowano metodę samo-ogniskowania fal Lamba przy pomocy podejścia polegającego na zastosowaniu operatora *time-reversal* (DORT); PA1, a następnie metodę projektowania i prototypowania matryc dwuwymiarowych przy wykorzystaniu wibrometru laserowego; PA6. Przedstawiono nowe narzędzia do wyznaczania charakterystyk dyspersyjnych obiektów płytowych przy pomocy transformacji *slant-stack*; PA7 oraz oceny własności materiału z jakiej jest wykonana płyta na podstawie pomiaru jej charakterystyk dyspersyjnych; PA9.

Byłem głównym edytorem książki wydanej przez John Wiley & Sons. (w roku 2013 w j. angielskim oraz ostatnio w przetłumaczonej na j. chiński)⁴, w której opublikowaliśmy rezultaty uzyskane w ramach tego projektu MONIT.

Odrębny projekt polegał na opracowaniu nowych płaskich przetworników piezoelektrycznych do SHM z elektrodami palczastymi i substratem piezoelektrycznym z makro-kompozytu piezoelektrycznego (MFC – *macro-fiber composite*). Zasada działania przetworników z elektrodami palczastymi (*interdigital transducers*), które są używane w filtrach ceramicznych wykorzystujących powierzchniową fale akustyczną (SAW – *surface acoustic wave*) została przez nas zastosowana do wzbudzania i odbioru fal Lamba. Skonstruowano kilka typów prototypów przetworników na substracie wykonanym z MFC i zbadano ich własności kierunkowe przy pomocy wibrometru laserowego. Zaletą tych przetworników jest ich czułość zależna od długości fali, a także ich płaska i elastyczna konstrukcja szczególnie odpowiednia do zastosowań w SHM. Wyniki przedstawiono w PA3 i CA9, CA11, a także K1 i K2. W celu zwiększenia zakresu zastosowań zaproponowano rozwiązanie pozwalające na zmianę rozstawu elektrod, a więc także zmianę długości fali do której przetwornik jest dopasowany; rozwiązanie to stało się przedmiotem zgłoszeń patentowych PP3 i PP4.

We współpracy z prof. B. Piwakowskim zajmowałem się też bezkontaktowymi głowicami ultradźwiękowymi propagującymi fale akustyczne przez powietrze do struktury płytowej w układzie *pitch-catch*, gdzie głowice są umieszczone z jednej strony płyty. Wykazano, że można uzyskać tą metodą wyraźne B-scany struktury kompozytowej umożliwiające wykrycie defektów na podstawie zjawisk, takich jak, ugięcie i konwersja postaci fali Lamba; wyniki przedstawiono na konferencjach CA3 i CA12.

W latach 2011-14 brałem udział w projekcie NCBiR LIDER kierowanym przez dr. K. Dragana, którego część eksperymentalna SYMOS, polegająca na testowaniu całego samolotu poddanego próbie zmęczeniowej, dostarczyła dużej ilości rzeczywistych sygnałów zarejestrowanych przez przetworniki piezoelektryczne umieszczone w testowanym samolocie. Zastosowano narzędzia sztucznej inteligencji (sieci neuronowe różnych typów) do przetwarzania tych sygnałów w celu uzyskania niezawodnych klasyfikatorów wykrywających uszkodzenia (głównie pęknięcia zmęczeniowe) we wczesnej fazie ich powstawania. Zbadano własności różnego typu sieci neuronowych w zastosowaniu do klasyfikacji sygnałów na podstawie wskaźników uszkodzeń używanych w SHM; w szczególności opracowano klasyfikator neuronowy bazujący na komitecie sieci neuronowych (*ensemble classification*). Wyniki opublikowano w PA4, PA5 i PA8 oraz CA13. Opracowano metodę klasyfikacji uszkodzeń w zmiennych warunkach środowiskowych opartą na zastosowaniu fuzji danych uzyskanych z różnych klasyfikatorów; CA17.

Obecnie przygotowuje wniosek projektu badawczego w dziedzinie sonochemii, w szczególności zastosowania ultradźwięków wysokiej mocy do dezynfekcji wody zrzucanej z oczyszczalni ścieków.



Kraków, 25 lipca, 2015 roku.

⁴ *Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications*, T. Stepinski, T. Uhl and W. Staszewski, editors, John Wiley & Sons, Ltd, June, 2013, 328 pp