

Autoreferat

1. Imię i nazwisko.

Ziemowit Dworakowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

Dyplom doktora nauk technicznych – uzyskany w 2016 roku na Akademii Górniczo - Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie za rozprawę doktorską pt. *„Zastosowanie metod sztucznej inteligencji w automatycznej diagnostyce struktur płytowych”*

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

2017 r. – 2020 r. – Starszy referent techniczny, AGH

2020 r. – nadal – Adiunkt naukowo-badawczy, AGH

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy.

4.1 Wprowadzenie – automatyzacja decyzji w monitorowaniu struktur

Naturalne metody obliczeniowe są obecnie powszechnie aplikowane do rozwiązywania problemów w zakresie szeroko pojętej inżynierii – w szczególności w automatyzacji procesów decyzyjnych. Rozwiązania oparte o sieci neuronowe lub inne automatyczne klasyfikatory stają się jednym ze standardowych sposobów interpretowania znaczenia danych zbieranych w badaniach lub monitorowaniu struktur mechanicznych w szerokim zakresie rozciągającym się od dużych obiektów inżynierii lądowej, przez maszyny przemysłowe aż do pojazdów i statków powietrznych. Skuteczne projektowanie takich systemów decyzyjnych wymaga współpracy ze strony praktyków przemysłowych z dużym doświadczeniem związanym z inżynierią

mechaniczną, oraz specjalistów w zakresie metod uczenia maszynowego z obszaru automatyki i robotyki. W obszarze łączącym rzeczywistość przemysłową i uczenie maszynowe mogą jednak pojawić się punkty, w których oczekiwania specjalistów od uczenia maszynowego oraz inżynierów mechaników rozmiągają się – co prowadzić może do znacznego ograniczenia skuteczności stosowanych metod interpretacji danych.

Typowa ścieżka, na jakiej kształcą się specjaliści od uczenia maszynowego, uwzględnia implementację i testowanie nowych algorytmów uczenia maszynowego na podstawie wzorcowych zbiorów danych, tzw. *benchmarków*. Zbiory te, publicznie dostępne w zbiorach uczelni lub zasobach internetowych ilustrują najczęściej typowe i ciekawe przypadki klasyfikacyjne lub regresyjne. Ich cechą wspólną jest najczęściej brak lub niewielka liczba obserwacji odstających (tzw. *outlierów*), spójny opis, brak błędów etykietowania oraz bogate zróżnicowanie danych w obrębie konkretnej klasy.

Z drugiej strony, w praktyce inżynierskiej dane zawierają zwykle pomiary nie spełniające powyższych kryteriów. Danych bywa zbyt mało, mogą być zbierane za pomocą różnych urządzeń a co za tym idzie różnić się szczegółami akwizycji. Powszechne są obserwacje odstające, opisy bywają nieprecyzyjne, zdarzają się również błędy w etykietowaniu. Głównym jednakże problemem jest niewielkie zróżnicowanie wewnętrzne klas, nie pozwalające na uzyskanie rzeczywistej generalizacji. Aby wyjaśnić ten problem posłużymy się przykładem: Jeśli projektowany jest system klasyfikacyjny do rozpoznawania znaków drogowych, korzysta się zwykle ze zbioru wzorcowego zawierającego dziesiątki tysięcy zdjęć znaków różnych klas, wykonanych różnymi aparatami, w różnych warunkach oświetleniowych i różnych miejscach. Taki różnorodny zbiór może następnie zostać wykorzystany do budowy klasyfikatora, który w realnych warunkach osiągnie skuteczność porównywalną z walidacyjną. Z drugiej strony, aby wykrywać uszkodzenia określonego rodzaju w populacji maszyn wirnikowych wybiera się zwykle jedną lub kilka maszyn o określonych parametrach, do których następnie wprowadza się sztuczne uszkodzenia. Na tej podstawie wykonywane jest uogólnienie na całą populację maszyn o różnych parametrach - a efektem oczekiwanym jest wykrywanie wszystkich postaci danego typu uszkodzenia. Przypomina to próbę wykrywania znaków drogowych rzeczywistych na zdjęciach, podczas gdy zbiorem uczącym pozostaje kilka znaków narysowanych w zeszycie przez dziecko.

Powyższego porównania nie należy rozumieć jako próby krytyki obszaru inżynierii mechanicznej, ale jako zwizualizowanie skali trudności problemu z jakim mierzyć się muszą

osoby podejmujące zagadnienia uczenia maszynowego i automatyzacji procesu decyzyjnego w praktyce przemysłowej. Znaczny niedobór danych uczących - w szczególności uniemożliwiający poprawną generalizację nie wynika z hipotetycznego braku chęci czy motywacji osób zbierających dane, ale jest efektem prostego rachunku ekonomicznego. W przypadku monitorowania i automatycznego wykrywania uszkodzeń zróżnicowany zbiór uczący musiałby bowiem uwzględniać dane zbierane dla dużej liczby maszyn określonego typu oraz naturalnie występujące w tej populacji uszkodzenia - te ostatnie prawdopodobnie w setkach lub tysiącach przypadków. Zbiór danych musiałby być zatem przygotowany w oparciu o setki maszyn na których dopuszczalny byłby rozwój zaawansowanych uszkodzeń, uszkodzenia te musiałyby być dobrze udokumentowane, a wszystkie te procesy wykonane by były zanim system klasyfikacyjny osiągnie zdolność operacyjną. Dopuszczenie do pojawienia się setek przypadków uszkodzenia nie jest zazwyczaj możliwe w praktyce przemysłowej ze względów ekonomicznych.

Uogólniając, z punktu widzenia uczenia maszynowego problem interpretacji danych przemysłowych wymaga często takich sposobów działania, które zamiast maksymalizowania skuteczności systemu decyzyjnego na wybranym, w arbitralny sposób zdefiniowanym zbiorze uczącym, pozwolą raczej na opracowanie reguł uogólnionych, nawet jeśli zbiór uczący okaże się być nieobiektywny.

Jednym z możliwych sposobów działania w takich warunkach staje się wykorzystanie tzw. fuzji decyzji, tj. łączenie wyników działania wielu algorytmów jednocześnie. Przy zachowaniu założenia, że poszczególne decyzje podejmowane są w sposób możliwie niezależny, uogólniona skuteczność pozostaje zachowana nawet, jeśli niektóre elementy składowe systemu zawiodą. Koncepcja ta stała się podstawą większości prowadzonych przeze mnie prac i badań i pozwoliła na przygotowanie cyklu publikacji zatytułowanego **„Zastosowanie fuzji decyzji do zwiększenia niezawodności automatycznej diagnostyki struktur i urządzeń”**.

W następnych rozdziałach przedstawione zostaną poszczególne elementy cyklu, tj. zastosowanie fuzji decyzji w różnych aspektach monitorowania stanu struktur i urządzeń – od zespołowego podejścia do klasyfikacji uszkodzeń, przez interpretację sygnałów z fal prowadzonych w warunkach dużej zmienności temperaturowej, aż po łączenie metod detekcji uszkodzeń dla struktur belkowych i płytowych z wykorzystaniem systemów wizyjnych i filtracji

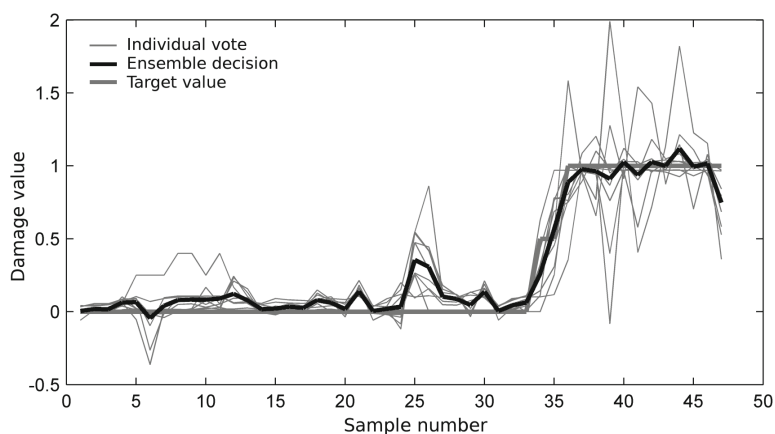
modalnej oraz identyfikację obiektów nieliniowych. W każdym z przedstawionych zagadnień cechą wspólną jest wykorzystanie synergii pomiędzy różnymi podejściami do automatycznego procesu decyzyjnego lub łączenie w całość decyzji cząstkowych w celu uzyskania systemu o wyższej skuteczności. W przedstawionym cyklu zawarte są trzy pozycje [c1, c2, c3] powstałe przed uzyskaniem przeze mnie stopnia doktora, które zostały w nim umieszczone w celu zachowania klarowności przekazu i ilustracji prowadzonych badań w sposób spójny wraz z ich początkową inspiracją i pracami wstępnymi.

4.2 Zespoły sieci neuronowych

Sieci neuronowe są powszechnie używane jako uniwersalne narzędzie do interpretowania danych, tj. wykonywania klasyfikacji lub regresji na podstawie przyjętego zestawu wartości mierzonych, stanowiących wejścia do systemu decyzyjnego. Należy jednak zauważyć, że sieci neuronowe są stosunkowo wrażliwe na przeuczenie: jeśli zbiór uczący nie jest wystarczająco zróżnicowany i nie oddaje pełnej specyfiki rozwiązywanego problemu, a jedynie jego wycinek, bardzo łatwo doprowadzić można do sytuacji, w której opracowywany klasyfikator neuronowy wprawdzie skutecznie rozwiązuje problem na podstawie niewielkiego zbioru danych dostępnego na etapie nauki oraz wstępnych testów, nie wykazuje jednak wystarczających zdolności generalizacyjnych, gdy poradzić sobie musi z rzeczywistym problemem. Jednym z rozwiązań tego problemu jest tzw. podejście zespołowe lub komitetowe do uczenia sieci neuronowych, znane pod angielską nazwą *ensemble*. Ogólnie polega ono na rozwiązywaniu przedstawionego problemu z wykorzystaniem zestawu sieci neuronowych, a następnie wykonaniu fuzji rozwiązań poprzez ważone uśrednienie wskazań poszczególnych sieci. Pomimo faktu, że z sukcesem wykazano skuteczność takiego podejścia w sytuacjach, w których zbiory uczący i testowy pochodzą z rozkładów nieco różniących się od siebie, podejście to jest zaskakująco mało znane w inżynierii mechanicznej: wciąż większość prac ukazujących się na łamach najlepszych periodyków naukowych uwzględnia stosowanie pojedynczych sieci, mimo że zastosowanie zespołu najprawdopodobniej przyczyniłoby się do poprawy powtarzalności wyniku oraz uzyskania większej niezależności diagnozy w stosunku do wybranego zbioru uczącego. Rozpoczęcie prac nad tą koncepcją nastąpiło w trakcie realizowania przeze mnie pracy doktorskiej, w której rozwijałem zespołowy klasyfikator neuronowy do klasyfikacji pęknięć zmęczeniowych propagujących w strukturze samolotu. Zdecydowałem się na zaproponowanie nowego, rozbudowanego sposobu wyboru sieci

neuronowej, w którym zespół tworzony jest nie tylko z sieci typu *wielowarstwowy perceptron* o podobnych strukturach, ale również w oparciu o sieci auto-asocjacyjne i radialne.

Zaproponowana metoda została z sukcesem przetestowana w zagadnieniu interpretacji stanu struktury na podstawie wyników pomiarów z wykorzystaniem fal prowadzonych. Rozpoczęcie prac w tym obszarze nastąpiło w trakcie realizacji mojej pracy doktorskiej [c2, c3, k13] a jej rozwój był kontynuowany również po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora [c7]. Warto zauważyć, że zaproponowana przeze mnie metoda pozwoliła na uzyskanie skuteczności detekcji uszkodzeń na poziomie do 99.91% w przypadku monitorowania rzeczywistej struktury samolotu a zadania o takim stopniu złożoności nie były wcześniej przedstawiane w literaturze naukowej [c7]. Należy również zauważyć, że zaproponowany sposób działania okazał się możliwy do zastosowania w licznych problemach monitorowania stanu struktur. W pracy [c5] wykazałem skuteczność działania klasyfikatora o tej samej strukturze nie tylko w problemie powiązanym z tematyką pracy doktorskiej (tj. klasyfikacja pęknięć zmęczeniowych), ale również w problemie predykcji mocy generowanej przez turbinę wiatrową – na potrzeby wykrywania jej uszkodzeń. Jest to osiągnięcie istotne głównie z tego powodu, że pokazuje uniwersalność zaproponowanego rozwiązania: dedykowana struktura i sposób nauki klasyfikatora zespołowego pozwalają osiągnąć skuteczność wyższą niż rozwiązanie klasyczne (oparte o jedną sieć) konsekwentnie, w różnych problemach klasyfikacyjnych. Przedstawione rozwiązanie pozwoliło na usunięcie ryzyka pojawiania się znacznych błędów w rezultatach zwracanych przez sieć w obszarach przestrzeni decyzyjnej, w których zbiór uczący wykazywał niedostateczne pokrycie – co nie było możliwe do realizacji z zastosowaniem pojedynczej sieci neuronowej [c5]. Ilustrację osiągnięcia przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1 - Działanie zespołu sieci neuronowych (Ensemble decision, czarna linia) w porównaniu do działania pojedynczych sieci (Individual vote, cienka szara linia) w ocenie stanu struktury (Target value, gruba szara linia), przedruk za [c5].

Rozszerzając zakres i tematykę swoich działań, podejście komitetowe do uczenia sieci neuronowych zaproponowałem następnie w kolejnych dwóch zagadnieniach z obszaru inżynierii mechanicznej: w zagadnieniu wykrywania anomalii w maszynach wirnikowych [c9] oraz w zagadnieniu identyfikacji siły kontaktu w tzw. ruchu *stick-and-slip* – gdzie zastosowanie zespołu sieci neuronowych pozwoliło znacznie podnieść dokładność estymacji pętli histerezy [8].

4.3 Wykrywanie anomalii w maszynach wirnikowych z zastosowaniem podejścia zespołowego

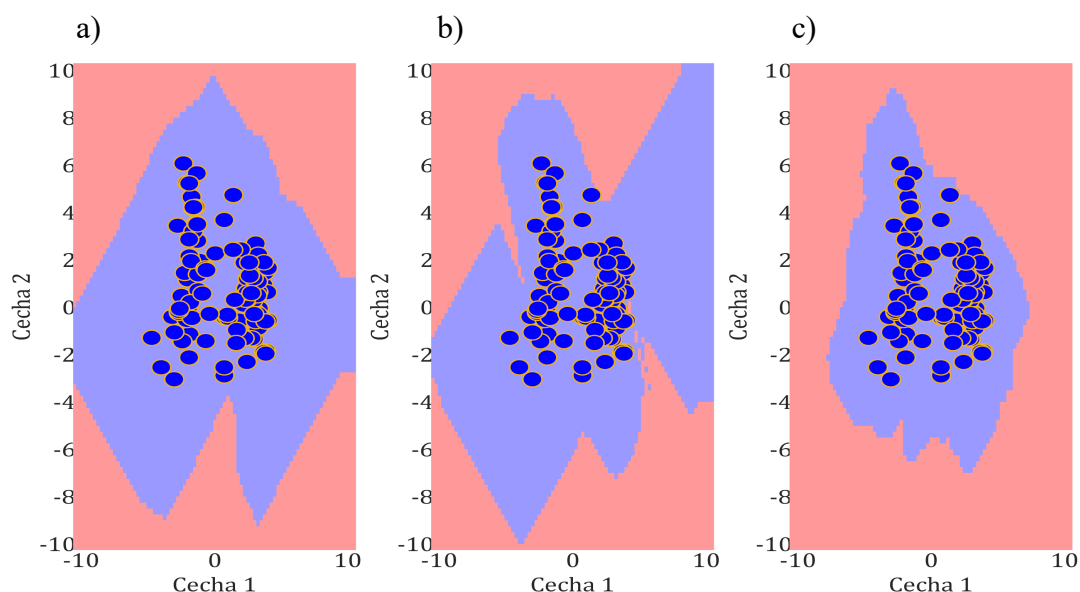
Najbardziej intuicyjne podejście do wykrywania uszkodzeń z wykorzystaniem naturalnych metod obliczeniowych powinno uwzględniać zebranie danych reprezentujących różne rodzaje uszkodzenia; ich cechy będą następnie wykrywane na nowych danych, nieznanymi na etapie treningu, co pozwoliłoby na uzyskanie skutecznej klasyfikacji. Niestety, o ile dane reprezentujące nieuszkodzony stan maszyny dostępne są zazwyczaj w nadmiarze, zebranie danych odnoszących się do możliwych stanów uszkodzonych jest zwykle poważnym wyzwaniem – po pierwsze z powodu dużej liczby możliwych dla danej maszyny uszkodzeń, po drugie zaś z powodu wysokiego kosztu pozyskiwania danych z maszyn uszkodzonych: zbiór danych musiałby uwzględniać sztucznie przygotowywane eksperymenty, podczas gdy dane zbierane w stanie normalnym mogą być pozyskiwane podczas normalnej pracy maszyny. Z tego powodu podejściem zdobywającym obecnie popularność jest tzw. wykrywanie anomalii, znane pod angielskimi odpowiednikami *anomaly detection*, *novelty detection* lub *outlier analysis*. Założenia metody zakładają wykorzystanie na etapie treningu wyłącznie danych reprezentujących stan normalny, a następnie zdefiniowanie obszaru w przestrzeni w którym dane te się znajdują. Na etapie wykorzystywania metody pomiary, które wykroczą poza zdefiniowany zakres nazywane są *anomaliami* i stanowią przesłanki o obecności uszkodzenia

w maszynie. Istnieje wiele metod wykrywania anomalii, podzielonych w kilka typowych kategorii (np. metody bazujące na dystansach w przestrzeni cech, metody bazujące na teorii informacji, metody bazujące na dziedzinie itd.). Jedną z wykorzystywanych metod jest stosowanie auto-asocjacyjnych sieci neuronowych, czyli sieci o strukturze autoenkodera. Budowa autoenkoderów wykorzystuje bazową strukturę sieci typu wielowarstwowy perceptron (tzn. z technicznego punktu widzenia autoenkoder jest wielowarstwowym perceptronem). Elementem wyróżniającym autoenkodery jest posiadane przez nie „wąskie gardło” (ang. *bottleneck*) – czyli warstwa o niewielkiej ilości neuronów w stosunku do warstw wcześniejszych i późniejszych, co wymusza wytworzenie w sieci uogólnionej reprezentacji danych wejściowych. W zadaniu wykrywania anomalii autoenkodery, jako sieci auto-asocjacyjne, uczone są poprzez zastosowanie wyjść tożsamyh z wejściami, tj. sieć otrzymuje zadanie skopiowania danych wejściowych na swoim wyjściu.

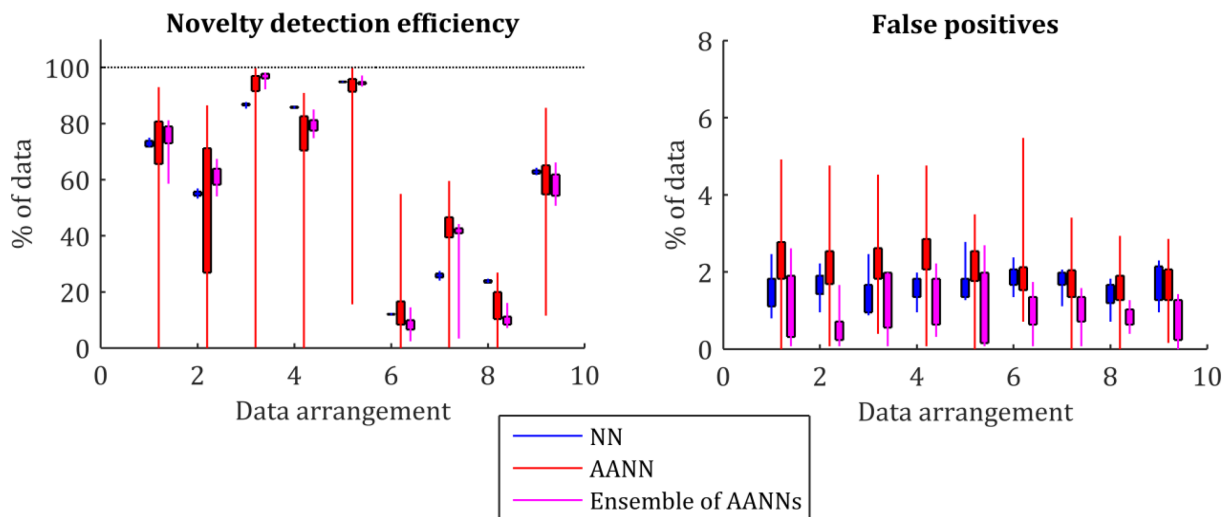
W procesie uczenia sieć wytwarza reprezentację ułatwiającą to mapowanie, tj. umożliwiającą dla szeregu znanych danych uczących wykonanie mapowania z dużą dokładnością. W fazie operacyjnej wytrenowana w ten sposób sieć wykazuje dobrą skuteczność (tj. udane kopiowanie wejścia na wyjście) dla danych podobnych do próbek znajdujących się w zbiorze uczącym oraz niską skuteczność dla danych nietypowych (anomalii). Miarą skuteczności jest zazwyczaj błąd dopasowania – czyli np. kwadrat odległości między otrzymanym i pożądanym wektorem wyjściowym.

Zaletą autoenkoderów jest dobra skalowalność w wielowymiarowe przestrzenie (w przeciwieństwie np. do popularnej metody k-najbliższych sąsiadów). Ich podstawową wadą jest natomiast nieprzewidywalność treningu: dwa autoenkodery uczone na podstawie tych samych danych mogą wykazywać znacząco różną skuteczność. Ilustrację tego problemu przedstawiono na Rys. 2. Aby umożliwić zastosowanie autoenkoderów w zadaniu wykrywania anomalii maszyn wirnikowych zaproponowałem ponownie wykorzystanie podejścia komitetowego. Zamiast zastosowania pojedynczego detektora anomalii, rozwiązanie opiera się na ważonej sumie wskazań uzyskanych z zestawu autoenkoderów. Wykazałem, że takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie znacząco lepszych i bardziej powtarzalnych wyników niż klasyczne podejścia oparte na metodzie k-najbliższych sąsiadów lub wykorzystaniu pojedynczego autoenkodera, niezależnie od rozważanego przypadku uszkodzenia [c9]. Część otrzymanych wyników przedstawiono na rys. 3, gdzie porównano metodę zespołową z metodami uwzględniającymi pojedyncze klasyfikatory (autoenkoder oraz klasyfikator bazujący na porównywaniu dystansów do próbek w zbiorze uczącym). Metody przetestowano

pod względem statystycznym, uśredniając wskazania z wielu cykli ich trenowania i testowania. W zakresie detekcji uszkodzeń mediana wskazań dla metody zespołowej pozostawała relatywnie wysoka lub najwyższa. Przykładowo, w optymalnej konfiguracji (konfiguracja trzecia w kolejności na rys. 3), metoda zespołowa uzyskała medianę skuteczności wykrywania uszkodzeń na poziomie 97% przy jednoczesnej skuteczności metod dystansowej i korzystającej z pojedynczego autoenkodera na poziomach odpowiednio 86% i 93%. Warto zauważyć, że w dziedzinie wykrywania uszkodzeń ta zmiana jest znacząca, bowiem powoduje ponad dwukrotne zmniejszenie częstotliwości pomijania uszkodzeń przez testowany system. W zakresie wskazań fałszywie pozytywnych mediana wyników uzyskiwanych przez metodę zespołową pozostawała konsekwentnie najniższa, niezależnie od testowanej konfiguracji i organizacji danych. Ma to szczególnie istotne znaczenie – bowiem duża ilość wskazań fałszywie pozytywnych zazwyczaj uniemożliwia praktyczne wykorzystanie metod detekcji anomalii.



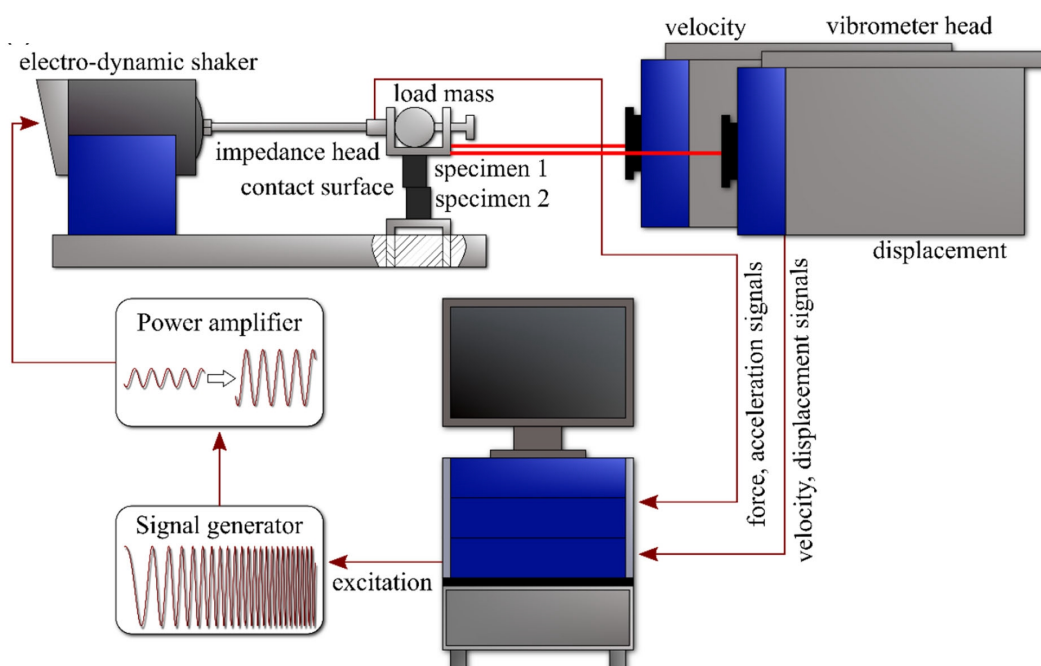
Rys. 2 - Przykład podziału przestrzeni dwuwymiarowej na „normalną” i „nietypową” przez (a,b) dwa różne autoenkodery o tej samej strukturze, uczone na tym samym zbiorze danych normalnych oraz (c) zespół 10 autoenkoderów uczonych na tym samym zbiorze danych normalnych. Próbkę uczącą reprezentowane są przez niebieskie znaczniki. Obszar normalny zaznaczono na błękitno, obszar reprezentujący anomalie na różowo.



Rys. 3 - Przedstawienie wyników w zakresie detekcji anomalii przez zespół autoenkoderów (Ensemble of AANNs, kolor różowy) w porównaniu do metody dystansowej (NN, kolor niebieski) i pojedynczego autoenkodera (AANN, kolor czerwony). Metoda zespołowa utrzymuje dużą powtarzalność i relatywnie dużą skuteczność wykrywania anomalii przy jednocześniej najmniejszej ilości wskazań fałszywie pozytywnych. Przedruk za [c9].

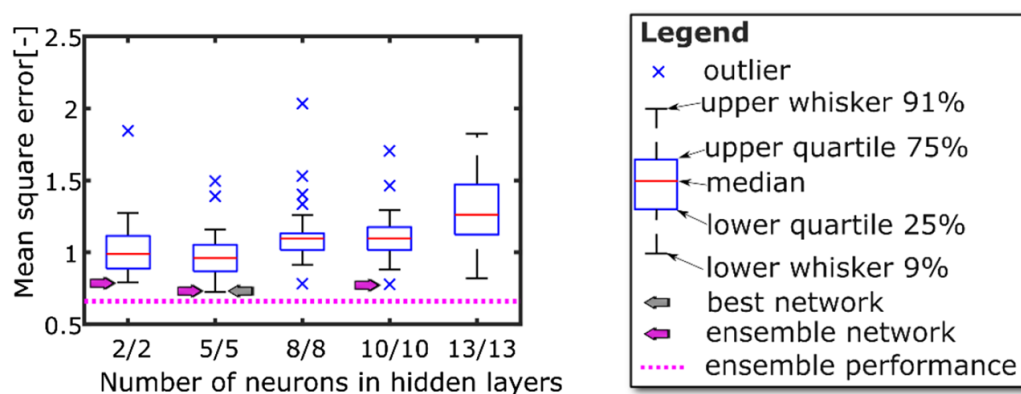
4.4. Identyfikacja systemów nieliniowych z zastosowaniem podejścia zespołowego

Identyfikacja nieliniowych systemów stanowi zazwyczaj duże wyzwanie. Jednym z przykładów są obiekty o histerezy charakterystyce sztywności. Praktycznym modelem takiego obiektu może być przedstawiony na Rys. 4 układ, w którym kontakt pomiędzy próbkami powoduje przechodzenie pomiędzy tarcieniem statycznym a tarcieniem dynamicznym powodując tzw. ruch *stick-and-slip*. W tym przykładzie model kontaktu (pętla histerezy opisująca zależność siły w funkcji przemieszczenia) zidentyfikowany został za pomocą pojedynczych par sieci neuronowych (zestrojonych do identyfikowania kształtu pętli histerezy oraz chwilowego położenia na niej obserwowanego obiektu) oraz zespołu takich par. Wykazano, że podejście zespołowe ma dużą przewagę nad podejściem „klasycznym”, tj. opartym o pojedyncze sieci w każdym z dwóch zagadnień. Rezultat pracy opublikowany został w [c8].



Rys. 4 – Układ do identyfikacji nieliniowej siły tarcia – przedruk za [c8]

Mój wkład w powstanie wspomnianej publikacji opierał się na zaproponowaniu metody zespołowej w miejsce stosowanej poprzednio przez zespół metody „klasycznej” i zapewnienie w ten sposób znacznego podniesienia skuteczności raportowanej metody. Ponownie, w przypadku zastosowania metody zespołowej zarejestrowano wyniki na znacząco lepszym poziomie (Rys. 5). Błąd średniokwadratowy metody zespołowej pozostawał na poziomie 0.7 jednostki przy medianie wyników dla pojedynczej sieci o najkorzystniejszej strukturze na poziomie 0.96 jednostek i rezultatach w najmniej korzystnym przypadku przekraczających 2 jednostki dla sieci dwuwarstwowych. Zastosowana metoda pozwoliła na poszerzenie stanu wiedzy w dziedzinie identyfikacji systemów nieliniowych [c8].



Rys. 5 - Porównanie wyników osiąganych przez rozwiązanie zespołowe (różowa linia) do wyników osiąganych przez sieci dwuwarstwowe działające pojedynczo (wykres pudełkowy), przedruk za [c8].

4.5. Zastosowanie fuzji decyzji w wykrywaniu uszkodzeń belek

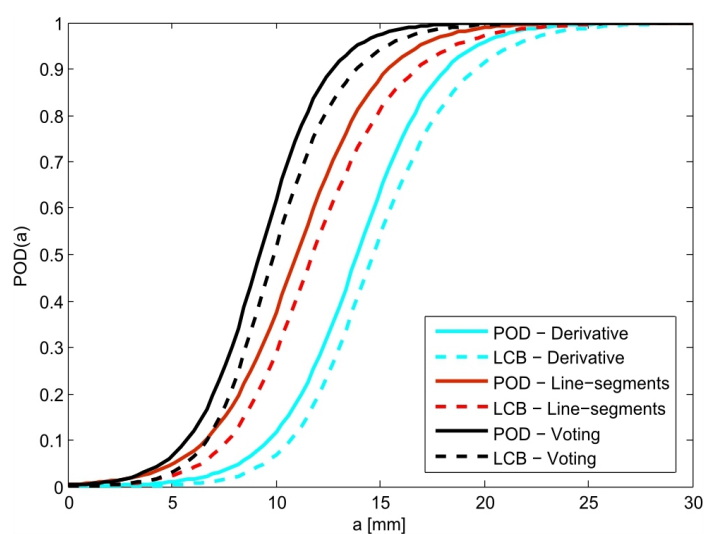
Praktycznym przykładem stosowania fuzji decyzji do wykrywania uszkodzeń w warunkach praktycznych jest zaproponowany przeze mnie algorytm, opublikowany w pracy [c4] pod nazwą *Voting Method*. W kolejnych pracach będących obecnie w przygotowaniu oraz w ramach realizowanego obecnie projektu MAGWIZ metoda przemianowana została na *Field Fusion Method (FFM)* i pod tą nazwą zostanie opisana tutaj.

W typowych przypadkach monitorowania stanu struktur zadaniem systemu monitorującego jest często podanie wskaźnika uszkodzeń (ang. *damage index, DI*) informującego o stopniu uszkodzenia (a pośrednio też często o pewności diagnozy – DI ma tym większą wartość, im większą zmianę w strukturze system wykrywa). W bardziej zaawansowanych zadaniach do samego wykrywania uszkodzenia dochodzi jeszcze jego lokalizacja – np. w formie podania współrzędnych uszkodzenia. Algorytm FFM wymaga zastosowania co najmniej dwóch metod źródłowych zwracających wskaźnik wykrytego uszkodzenia (DI) oraz jego współrzędne. Dla każdego z tych wskazań algorytm określa rozkład prawdopodobieństwa położenia rzeczywistego uszkodzenia poprzez zdefiniowanie na przestrzeni współrzędnych wartości prawdopodobieństwa w formie funkcji Gaussa, której maksymalna wartość wynika z wartości wskaźnika uszkodzenia. Wartość maksimum sumy takich gaussianów staje się nowym wskaźnikiem uszkodzenia, a jego położenie nową wykrytą lokalizacją uszkodzenia.

Siła algorytmu FFM bierze się z faktu, że skuteczność pojedynczej metody jest ograniczana przez szum pomiarowy – próg detekcji ustalić należy na tyle wysoko, aby wskazania fałszywie pozytywne występowały pomijalnie rzadko. Niestety powoduje to wystąpienie sytuacji, w której metody składowe mogą wykrywać uszkodzenie poprawnie, ale wartość odpowiednich DI jest zbyt niska, aby spowodować wyzwolenie alarmu (faktyczną detekcję). Jeżeli jednak kilka metod spowoduje podniesienie wartości wskaźnika uszkodzenia w tej samej lokalizacji, jest to silna przesłanka o obecności w tym regionie uszkodzenia.

Praktyczną ilustracją działania algorytmu FFM jest przedstawiony w pracy [c4] przykład lokalizacji uszkodzeń w jednostronnie podpartych belkach z zastosowaniem pomiaru z wykorzystaniem systemu wizyjnego. System wizyjny (złożony z zestawu pełnoklatkowych aparatów fotograficznych) dokonuje pomiaru stanu struktury przed i po wprowadzeniu

uszkodzenia. Tzw. *różnica krzywych ugięcia struktury* stanowi wejście do dwóch metod wykrywania uszkodzeń: metody bazującej na drugiej pochodnej, pozwalającej na wykrycie uszkodzenia za pomocą poszukiwania lokalnego załamania krzywej ugięcia, oraz opracowanej przez mnie *metody odcinków*, polegającej na wpisywaniu w krzywą ugięcia dwóch odcinków. Miejsce łączenia odcinków stanowi o lokalizacji uszkodzenia, a ich kąt jest wskaźnikiem uszkodzenia (określa jego wartość). Dwie metody połączone algorytmem FFM (w artykule pod nazwą *Voting method*) pozwoliły na znaczne podniesienie skuteczności metody, co wykazano w opracowanej przez A. Gallina analizie prawdopodobieństwa wykrycia uszkodzenia przedstawionej na Rys. 6. Aby określić praktyczne znaczenie wyników można zwrócić uwagę przykładowo na prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia o wielkości 10 mm – metody składowe osiągają tutaj ok. 40% prawdopodobieństwa wykrycia, podczas gdy metoda FFM daje wynik na poziomie 60%. Analogicznie, metoda FFM wykrywa z 90% prawdopodobieństwem uszkodzenie o wielkości ok. 12mm, podczas gdy pozostałe metody z takim prawdopodobieństwem wykrywają dopiero uszkodzenie o wielkości 15 mm, poprawa jest więc znacząca [c4].



Rys. 6 - Wyniki prawdopodobieństwa wykrycia uszkodzenia (POD) na podstawie trzech zaproponowanych metod. Opracowany algorytm FFM (Voting) pozwala na znaczącą poprawę wyników – przedruk za [c4].

4.6 Zastosowanie fuzji decyzji w kompensacji efektów środowiskowych

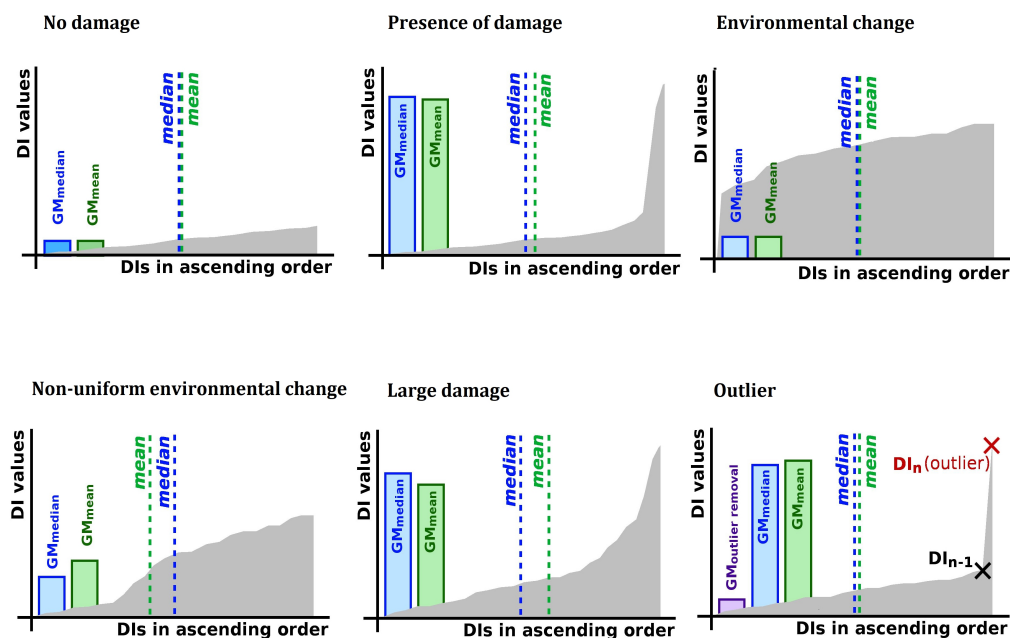
Trzecim z obszarów w których zaprezentowane zostanie zastosowanie fuzji decyzji, obok zastosowania podejścia zespołowego i wykrywania uszkodzeń w belkach, jest odróżnianie wpływu efektów środowiskowych od wpływu uszkodzenia. tzn. skuteczne wykrywanie uszkodzeń w warunkach, w których badana struktura poddawana jest jednocześnie znacznym

wahaniom warunków środowiskowych. Przykładem tej sytuacji może być monitorowanie stanu próbek typu płytowego z zastosowaniem fal prowadzonych w warunkach dużej zmienności temperaturowej, na którą fale prowadzone są bardzo wrażliwe. Przed podjęciem przeze mnie prac w tym temacie w literaturze znane były dwa podejścia do kompensacji efektów temperaturowych: wykorzystanie Optymalnej Selekcji Referencji (ang. *Optimal Baseline Selection, OBS*) oraz Rozciąganie Sygnału Referencyjnego (ang. *Signal Stretch Approach, SSA*). Pierwsza z metod polega na zebraniu banku rozwiązań referencyjnych w różnych temperaturach a następnie wykonywania diagnozy poprzez dopasowanie „właściwej referencji” – tj. takiej, która pozwala na zminimalizowanie wartości wskaźnika uszkodzenia. Drugie z rozwiązań polega na sztucznym „rozciąganiu” bądź „ściskaniu” sygnału, zazwyczaj poprzez wydłużenie bądź skrócenie podstawy czasu.

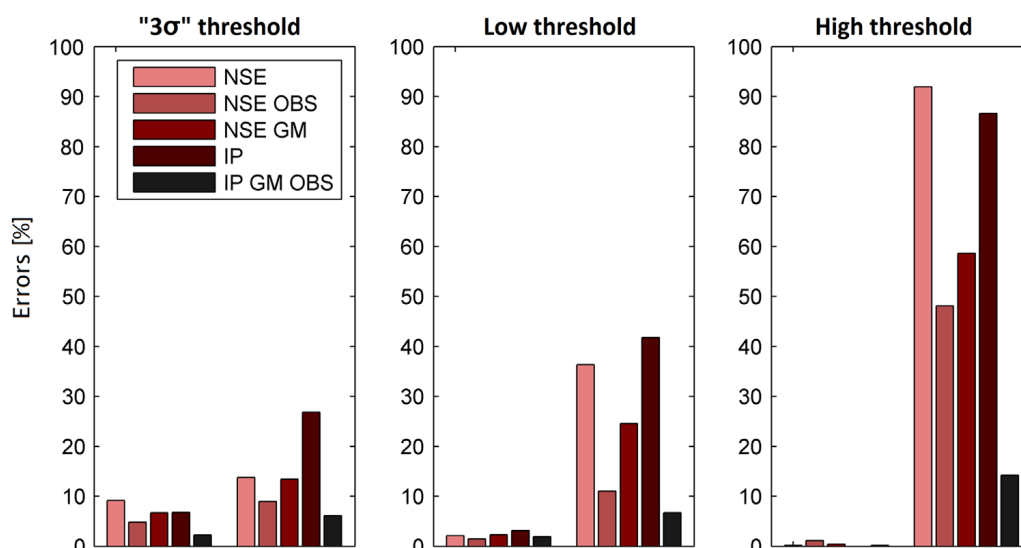
W celu zminimalizowania szkodliwych efektów tej sytuacji zaproponowałem nowe rozwiązanie bazujące na tzw. Pomiarze Grupowym (ang. *Group Measurement Approach, GM*). Zasada działania zwizualizowana została na rys. 4. Założenia metody zakładają, że w celu lokalizacji uszkodzeń monitorowany jest jednocześnie duży obszar struktury. Jednocześnie zakłada się, że uszkodzenie ma charakter lokalny, tj. nie wpływa znacząco na globalne parametry struktury lub manifestuje się w większym stopniu w niewielkim obszarze struktury. Dzięki temu wyznaczyć można globalny wskaźnik uszkodzenia dla całej struktury DI_{GM} , który w podstawowej wersji zakłada odjęcie od wartości największego wskaźnika uszkodzenia wartości mediany wszystkich wskaźników, co w przypadku gdy tylko niektóre rejony struktury wykazują zmiany, owocuje dużą wartością wynikowego wskaźnika, natomiast podniesienie wartości wszystkich wskaźników uszkodzeń o jakąś wartość (wynikającą np. ze zmiany temperatury) spowoduje, że wartość wynikowego wskaźnika uszkodzenia będzie relatywnie niewielka. W przypadku, gdy możliwe jest zbieranie danych z bardzo wielu punktów pomiarowych (tzn. zakłada się, że uszkodzenie zostanie zaobserwowane przez min. 2 punkty) możliwe jest zastosowanie wskaźnika DI_{GM} w wersji odpornej na obserwacje odstające – poprzez wykorzystanie drugiego najwyższego wskazania (jak na Rys. 4(f)). Wskaźnik DI_{GM} połączony został następnie z dwiema znanymi w literaturze metodami kompensacji wpływu temperatury, tj. wymienionymi wcześniej podejściami OBS i BSS, co pozwoliło na osiągnięcie wyniku znacznie wykraczającego poza obecny stan wiedzy w zadaniu kompensacji wpływu temperatury na fale prowadzone. Opisywana praca rozpoczęta została w trakcie przygotowywania przeze mnie pracy doktorskiej [k2], a po dodatkowym rozbudowaniu zaowocowała pierwszą publikacją w tym temacie [c6]. W publikacji tej wykonano porównanie dotychczasowych metod kompensacji temperatury z metodą autorską – co zaowocowało

znacznym podniesieniem skuteczności rozwiązania niezależnie od rozważanego progu czułości metody oraz konfiguracji eksperymentalnej. Przykładowo, konfiguracja w przypadku progu „ 3σ ” opracowana metoda spowodowała uzyskanie ok. 2,5% wskazań fałszywie pozytywnych i ok. 7% wskazań fałszywie negatywnych, podczas gdy najlepsza z pozostałych testowanych metod (OBS) miała te wskaźniki na poziomie odpowiednio 5% i 9%. Wybór otrzymanych wyników przedstawiono na Rys. 8.

Skuteczność zaproponowanego Pomiaru Grupowego została następnie zaprezentowana w usuwaniu wpływu temperatury w wykrywaniu uszkodzeń z zastosowaniem lokalnej filtracji modalnej [c10] oraz jako uniwersalny wskaźnik uszkodzenia w pracy porównującej zastosowanie transformaty falkowej i lokalnej filtracji modalnej w detekcji uszkodzeń płyt [c11]. W pierwszej z omawianych publikacji wskaźnik pozwolił na skuteczne odfiltrowanie wpływu temperatury, prowadzące do efektywnego wykrywania uszkodzeń. W drugiej był jedyną metodą pozwalającą na skuteczne odróżnienie wpływu uszkodzeń od wpływu zmian temperatury w warunkach rzeczywistych. Ani zastosowanie wyłącznie podejścia bazującego na transformacie falkowej, ani usunięcie komponentu pomiaru grupowego z podejścia bazującego na lokalnej filtracji modalnej (nieopublikowane) nie pozwoliły na skuteczne wykrycie rzeczywistych uszkodzeń na podstawie pozyskanych rzeczywistych danych.



Rys. 7 - Zasada działania pomiaru grupowego – przedruk za [c6]



Rys. 8 - Weryfikacja skuteczności różnych metod wykrywania uszkodzeń w warunkach zmienności temperaturowej dla fal prowadzonych, kolejno: Brak kompensacji (NSE), Kompensacja z wykorzystaniem podejścia OBS (NSE OBS), Kompensacja z wykorzystaniem pomiaru grupowego (NSE GM), Wykorzystanie podejścia BSS w formie algorytmu fazy chwilowej (IP), Autorska metoda fuzji decyzji (IP GM OBS). Lewa grupa pomiarów na każdym wykresie przypadku odnosi się do wskazań fałszywie pozytywnych, prawa grupa dotyczy pomiarów fałszywie negatywnych. Przedruk za [c6].

4.7 Podsumowanie oryginalnych osiągnięć przedstawionych w cyklu publikacji

Opisywany cykl publikacji połączony jest poprzez koncepcję zastosowania mechanizmu fuzji decyzji w celu poprawy istniejących rozwiązań w zakresie automatyzacji procesu decyzyjnego w monitorowaniu i analizie układów mechanicznych. Fuzja ta wykonywana jest w przedstawionym cyklu na kilka różnych sposobów: uśrednianie decyzji klasyfikatorów z wykorzystaniem podejścia zespołowego; łączenie wskazań wielu algorytmów kompensacji temperatury; łączenie wskazań wielu algorytmów wykrywania uszkodzeń w strukturach belkowych oraz odróżnianie uszkodzeń od wpływu zmian parametrów zewnętrznych poprzez wykorzystanie połączenia pomiarów przeprowadzanych w wielu miejscach. Następujące oryginalne osiągnięcia przedstawionego cyklu wynikające bezpośrednio z wykonywanej przeze mnie pracy uważam za swój wkład w dyscyplinę Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika:

[c1, c4]:

- zaproponowanie odcinkowej metody wykrywania uszkodzeń w strukturach belkowych
- zaproponowanie metody „głosowania” bazującej na fuzji decyzji, łączącej wskazania metody opartej na analizie drugiej pochodnej oraz metody odcinkowej, która charakteryzuje się skutecznością lepszą niż jakakolwiek inna zaproponowana metoda

[c2,c3,c7]:

- zaproponowanie metody bazującej na zespole sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń w strukturach lotniczych z wykorzystaniem fal prowadzonych
- zastosowanie po raz pierwszy w monitorowaniu struktur zespołu złożonego z czterech różnych typów sieci neuronowych
- zaproponowanie algorytmu nadającego się do wykrywania uszkodzeń w rzeczywistych, skomplikowanych strukturach, przetestowanego z sukcesem podczas pełnoskalowej próby zmęczeniowej rzeczywistego samolotu

[c5]:

- wykazanie, że opracowany klasyfikator zespołowy jest uniwersalny, tj. nadaje się do rozwiązywania zagadnień klasyfikacji i regresji w różnych zadaniach monitorowania struktur i wykazuje się przy tym skutecznością wyższą niż rozwiązanie „klasyczne”

oparte o pojedyncze sieci neuronowe

[c8]:

- wykazanie, że podejście zespołowe charakteryzuje się wyższą skutecznością również w dziedzinie identyfikacji nieliniowych parametrów systemów mechanicznych

[c9]:

- wykazanie, że podejście zespołowe pozwala na skuteczne rozpoznawanie anomalii maszyn wirnikowych, w szczególności w celu wykrywania uszkodzeń przekładni obiegowych

[c6]:

- zaproponowanie nowej metody tzw. „pomiaru grupowego”, pozwalającej na odróżnianie globalnego wpływu temperatury od lokalnych zmian struktury w celu wykrywania uszkodzeń w płytach z wykorzystaniem fal prowadzonych, opartej na łączeniu pomiarów wykonywanych w różnych punktach struktury
- opracowanie nowatorskiej metody kompensacji wpływu temperatury na pomiary wykonywane z wykorzystaniem fal prowadzonych, opartej na fuzji trzech metod pomiarowych: metody OBS, metody *signal stretch* oraz metody pomiaru grupowego

[c10,c11]:

- zastosowanie metody łączenia pomiarów z wielu obszarów struktury z wykorzystaniem Pomiaru Grupowego w celu wykrywania uszkodzeń w strukturach płytowych z zastosowaniem analizy modalnej i lokalnej filtracji modalnej

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Podstawowym ośrodkiem mojej aktywności naukowej pozostaje AGH w Krakowie i tutaj afiliowane są wszystkie raportowane przeze mnie publikacje. Duża część z tych osiągnięć powstaje jednak na podstawie działalności wykonywanej we współpracy z naukowcami z innych ośrodków, w tym zagranicznych. Osiągnięcia omawiane w ramach punktu 4, tj. prowadzące do powstania przedkładanego do oceny cyklu publikacji, powstały w wyniku intensywnej współpracy z Instytutem Technicznym Wojsk Lotniczych w Warszawie. W szczególności publikacje [c3, c5, c7] oraz dodatkowo zawarta poza cyklem publikacja [d1] powstały na podstawie eksperymentów przeprowadzanych w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych (ITWL) w Warszawie oraz Pełnoskalowej Próby Zmęczenia realizowanej w Pradze (Czechy). Część z eksperymentów w ITWL była wykonywana przeze mnie. Współpraca ta realizowana była w ramach projektu LIDER/35/43/L-2/10/NCBiR/2011 kierowanego przez płk. dr hab. inż. Krzysztofa Dragana, prof. ITWL.

Część mojej aktywności powiązanej z rozwijaniem i testowaniem systemów wizyjnych, prowadzącej do powstania m.in. publikacji [d5], wykonywana była we współpracy z naukowcami z Politechniki Krakowskiej i w oparciu o eksperymenty przeprowadzane tamże, również z moim osobistym udziałem.

W wyniku współpracy z naukowcami z uniwersytetu Sfax w Tunezji powstał ważny artykuł przeglądowy [d2] oraz dodatkowo artykuł konferencyjny [k1], przedstawiony na międzynarodowej konferencji IWSHM, 2017.

Aktualnie jestem kierownikiem finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju projektu LIDER (LIDER/3/0005/L-9/17/NCBR/2018), w ramach którego zrealizowana została ponowna współpraca z ITWL w Warszawie (realizacja eksperymentów zmęczeniowych oraz pakietu eksperymentów na komponentach lotniczych na potrzeby projektu zakończona w grudniu 2020) oraz współpraca z Universitat Politècnica de Catalunya w Barcelonie (weryfikacja wyników projektu na podstawie danych zbieranych tamże). W eksperymentach wykonywanych w ITWL w Warszawie brałem osobisty udział.

Dodatkowo, do aktywności poza AGH zaliczyć można również osobisty udział w międzynarodowych konferencjach naukowych organizowanych niejednokrotnie przez

zagraniczne jednostki naukowe, w szczególności Uniwersytet Stanford [k1, k8] ale również inne ważne europejskie ośrodki akademickie [k3, k4, k6, k14].

Poza AGH realizowana była również współpraca naukowa z przedsiębiorstwami Callstats (Helsinki, Finlandia, staż naukowy w siedzibie przedsiębiorstwa) oraz Elmodis (Kraków, Polska, współpraca w ramach projektu wdrożeniowego trwająca ponad rok).

Szczegółowe omówienie wszystkich powyższych osiągnięć w celu zapewnienia klarowności przekazu wykonane zostanie w punkcie 7, w którym umieszczone zostaną opisy wszystkich moich aktywności naukowych niepowiązanych bezpośrednio z osiągnięciem o którym mowa w art. 219 ust.1 pkt. 2 Ustawy.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Zarówno przed obroną doktoratu, tj. w latach 2011 – 2016, jak i w okresie późniejszym, tj. w latach 2016 – 2020, byłem zaangażowany w proces dydaktyczny prowadzony na Katedrze Robotyki i Mechatroniki, AGH w Krakowie. Byłem promotorem 23 prac inżynierskich i magisterskich, z których cztery zostały nagrodzone wyróżnieniem wydziałowym. Dziewięć z promowanych przeze mnie prac zostało przygotowanych w języku angielskim. Byłem promotorem pracy mgr. inż. Mateusza Heesch pt. „Adaptive active vibration control algorithm”, która zdobyła III miejsce w ogólnouczelnianym konkursie „Diamenty AGH”. Prowadziłem zajęcia z następujących przedmiotów: Systemy Wizyjne, Techniki Wizyjne, Przetwarzanie Sygnałów i Identyfikacja w Sterowaniu Urządzeń Mechatronicznych, Przetwarzanie Sygnałów i Identyfikacja w Monitorowaniu Urządzeń Mechatronicznych oraz odpowiedniki w.w. w języku angielskim. Dodatkowo prowadziłem również wyłącznie w języku polskim przedmioty Algorytmy Genetyczne i Ewolucyjne w Technice, Teoria Sterowania, Systemy Programowania Robotów. W 2016 roku prowadziłem zajęcia w ramach Szkoły Letniej dla studentów z Kazachstanu.

W zakresie aktywności organizacyjnej brałem udział w przygotowaniu dokumentacji do prestiżowej akredytacji ABET - *Accreditation Board for Engineering and Technology*, dla kierunków „Inżynieria mechatroniczna z językiem angielskim jako językiem wykładowym – studia pierwszego stopnia” oraz „Inżynieria mechatroniczna z językiem angielskim jako językiem wykładowym – studia drugiego stopnia, specjalność Projektowanie mechatroniczne”

realizowanych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH. Oba kierunki uzyskały w.w. akredytację stając się pierwszymi w Europie kierunkami o tej tematyce akredytowanymi przez ABET. Obecnie jestem wydziałowym koordynatorem ds. akredytacji ABET.

W ramach popularyzowania nauki, w latach 2014 – 2015 współpracowałem z Krakowskim Młodzieżowym Towarzystwem Przyjaciół Nauk i Sztuk w organizowaniu zajęć z Robotyki i Mechatroniki dla uczniów szkół gimnazjalnych i ponadgimnazjalnych na AGH. W roku 2018 zostałem zaproszony do udzielenia wykładu popularnonaukowego w Zespole Szkół Mechanicznych nr 1 w Krakowie na temat szans i zagrożeń związanych z rozwojem sztucznej inteligencji.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Na potrzeby przejrzystości przedstawienia głównego dokonania część prac wyłączona została z jego opisu. Prace nie powiązane bezpośrednio z dokonaniem przedstawione zostaną w niniejszym rozdziale.

7.1 Diagnostyka przekładni obiegowych

Diagnostyka przekładni obiegowych wpisuje się w szeroką kategorię wibrodiagnostyki, która jest jednym z najlepiej zbadanych i posiadającym największą liczbę praktycznych wdrożeń obszarem monitorowania stanu struktur. Automatyczne systemy wibrodiagnostyczne znane często pod angielskim terminem *Condition Monitoring* są obecnie powszechnie stosowane w dużej ilości przedsiębiorstw, w których praktyce przemysłowej wykorzystuje się maszyny wirnikowe. Pomimo bogatej historii i dużego dorobku istniejącego w niniejszym obszarze, zdecydowana większość praktycznie stosowanych metod diagnostycznych opiera się tutaj na wyznaczaniu trendów pojedynczych wskaźników uszkodzeń – szerokopasmowych, jak v_{RMS} , lub wąskopasmowych, jak analiza konkretnych prążków widma sygnału drgań reprezentujących np. kolejne harmoniczne częstotliwości rezonansowej lub powiązanej z budową maszyny (np. częstotliwość obrotowa wału, częstotliwość zazębienia przekładni itp.). Takie podejście owocuje zazwyczaj powstaniem skutecznych systemów diagnostycznych, które

wykrywają nie tylko obecność uszkodzeń, ale również jego typ i stopień – gdyż wpływ określonych rodzajów uszkodzenia na rejestrowane trendy wskaźników diagnostycznych jest dobrze opracowany. Niestety, podejście to posiada liczne ograniczenia związane z trudnością interpretacji widma sygnału drganiowego w przypadku braku możliwości porównania go z widmem referencyjnym, znaczną trudnością interpretacji wyników w warunkach dużej zmienności parametrów operacyjnych i środowiskowych oraz skomplikowaną geometrią monitorowanej maszyny, np. opartą na przekładni obiegowej.

Klasycznym przykładem zadania o wysokim poziomie trudności w wibrodiagnostyce jest monitorowanie stanu przekładni obiegowych stosowanych w turbinach wiatrowych – ze względu na skomplikowanie ich budowy, niewielką prędkość wału napędzanego, znaczne obciążenia jakim przekładnia jest poddawana oraz wysoką zmienność obciążenia i prędkości w czasie. Z tych powodów klasyczne metody wibrodiagnostyczne zazwyczaj nie przynoszą spodziewanych efektów, a raportowane w literaturze przypadki metod dedykowanych turbinom wiatrowym zazwyczaj sprowadzają się do weryfikacji metod w prostych eksperymentach laboratoryjnych, a nie w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. W 2019 roku we współpracy z innymi naukowcami pracującymi w ramach projektu EPICLA opublikowałem duży artykuł przeglądowy dotyczący w.w. kwestii [d5]. W artykule tym po raz pierwszy w literaturze naukowej wykonano przegląd naturalnych metod obliczeniowych dedykowanych monitorowaniu przekładni obiegowych, wykonano analizę przyczyn nieskuteczności klasycznych metod wibrodiagnostycznych w monitorowaniu przekładni obiegowych dużej mocy oraz zidentyfikowano potencjalne kierunki rozwoju pozwalające na zaproponowanie rozwiązań dedykowanych dla warunków dużej zmienności parametrów operacyjnych urządzeń. Mój wkład w powstanie przeglądu był znaczący, bowiem dotyczył m.in. przygotowania rozdziałów powiązanych z zastosowaniem naturalnych metod obliczeniowych oraz identyfikacji pięciu najlepszych kierunków rozwoju opartych na metodach istniejących w literaturze naukowej, tzn. fragmentów zawierających główne osiągnięcie przeglądu. Dwa ze zidentyfikowanych obiecujących kierunków zostały następnie rozwinięte we współpracy z zespołem projektowym w dwóch kolejnych pracach dotyczących odpowiednio wykrywania anomalii w pracy przekładni obiegowych [c8], oraz zastosowania podejścia *Instantaneous Circular Pitch Cycle Map (ICPCM)* [d4]. Pierwsza z prac opisana została w części poświęconej dokonaniu – bowiem oparta została na koncepcji fuzji decyzji różnych klasyfikatorów anomalii. Druga z tych prac zostanie opisana tutaj.

Metoda ICPCM po raz pierwszy zaproponowana wstępnie przez A. Jabłońskiego w 2012 roku polega na przedstawieniu wskaźników energii drgań przekładni w formie mapy rozpiętej na przestrzeni zbudowanej na dwóch osiach: stopniach monitorowanego wału oraz jego obrotach. Mapę zastosować można do dowolnego wału przekładni obiegowej a podstawowa idea jej stosowania jest analogiczna do synchronicznego uśredniania zarejestrowanych sygnałów w celu wyeliminowania szumu (wykonywanego w wibrodiagnostyce algorytmem *Time Synchronous Averaging*, TSA) – w przeciwieństwie do TSA nie uśrednia jednak wpływu komponentów periodycznych o okresie innym niż okres monitorowanego wału – przez co pozwala na obserwację modulacji wprowadzanych np. przez ruch planet wewnątrz przekładni obiegowej. W ramach prac w projekcie EPICLA metoda ICPCM została gruntownie zweryfikowana na podstawie symulacji numerycznych oraz eksperymentów rzeczywistych i opublikowana w czasopiśmie *Mechanical Systems and Signal Processing*. W ramach prac nad artykułem byłem zaangażowany w przetwarzanie danych oraz ich analizę prowadzącą do uzyskania ostatecznej interpretacji wyników.

Jednym z zagadnień powiązanych z wysoką zmiennością parametrów operacyjnych jest konieczność ich monitorowania. W praktyce proces ten realizowany jest zazwyczaj za pomocą tzw. znaczników fazy umieszczanych na obracającym się wale. Niestety, w licznych aplikacjach praktycznych – szczególnie wtedy gdy system diagnostyczny montowany jest na już działającym urządzeniu dostęp do wału jest utrudniony lub niemożliwy. Wprowadza to konieczność monitorowania prędkości obrotowej za pomocą algorytmów estymacyjnych. Dotychczas stosowane metody są jednak często zawodne i działają wyłącznie w przypadkach gdy zmiany prędkości są powolne lub mają niewielki zakres. W ramach projektu EPICLA zaproponowano algorytm monitorowania prędkości obrotowej oparty na selekcji obszaru zainteresowania i następnie ekstrakcji prędkości obrotowej na podstawie wyznaczenia momentów częstotliwościowych [d3]. Mój udział w powstaniu niniejszego artykułu uwzględniał analizę wyników w celu ich interpretacji. Dodatkowo, w ramach projektu zaproponowałem analogiczne rozwiązanie oparte na zastosowaniu wskaźników szerokopasmowych i systemu regresji opartego na uczeniu maszynowym [k1].

Poza osiągnięciami zaprezentowanymi szczegółowo powyżej, moje zaangażowanie w tematy powiązane z wibrodiagnostyką zaowocowało również powstaniem listy publikacji o mniejszym znaczeniu – głównie będącej owocem mojego osobistego udziału w konferencjach [k1, k3], przygotowywania artykułów konferencyjnych wraz z zespołem powiązanym z projektem EPICLA [k3, k7, k11, k12] lub w ramach prac realizowanych we współpracy

z przedsiębiorstwem Elmodis [k6].

7.2 Monitorowanie struktur z wykorzystaniem metod bezkontaktowych

Istotnym obszarem monitorowania struktur jest zastosowanie metod i algorytmów pozwalających na ocenę stanu technicznego struktur bezkontaktowo, tj. bez wykorzystania czujników umieszczanych wewnątrz lub na powierzchni struktury. Najczęściej pomiary takie realizowane są za pomocą metod wizyjnych lub laserowych. Oprócz wymienianego w rozdziale 4.5 algorytmu detekcji i lokalizacji uszkodzeń w strukturach opartego na fuzji decyzji brałem udział w publikacji zbioru prac powiązanych z wizyjnymi pomiarami bezkontaktowymi – głównie opartymi na wyznaczaniu cyfrowej korelacji obrazu w celu monitorowania różnych konstrukcji inżynierii lądowej, w szczególności napowietrznych linii elektroenergetycznych [k5, d6, k9] oraz żurawi przemysłowych [d5]. We wszystkich przedstawianych tu publikacjach byłem członkiem zespołu pomiarowego, wykonywałem przetwarzanie obrazu oraz analizę otrzymanych wyników.

7.3 Monitorowanie struktur w oparciu o analizę modalną

Powszechnie stosowanym w monitorowaniu struktur (w szczególności konstrukcji inżynierii lądowej) podejściem jest wykorzystanie analizy modalnej. Zmiany w kształcie bądź częstotliwości poszczególnych modów drgań odzwierciedlać bowiem mogą rozwój uszkodzeń wewnątrz struktury. Jednym z możliwych podejść do tego zagadnienia jest zaproponowana przez K. Mendroka metoda oparta na lokalnej filtracji modalnej. Metoda ta uwzględnia przeprowadzenie filtracji modalnej lokalnie, tzn. w oparciu o pomiary drgań wykonywane w wielu relatywnie niewielkich sąsiedztwach w obszarze struktury. Metoda ta pozwala na wykrywanie niewielkich uszkodzeń, których wpływ na globalne postaci drgań własnych jest zbyt mały by umożliwić jego wiarygodne wykrycie.

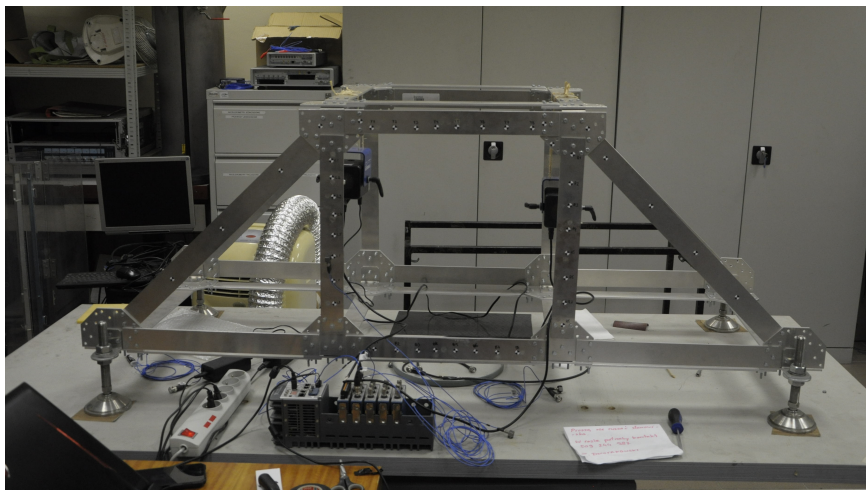
We współpracy z K. Mendrokiem oraz innymi naukowcami z Katedry Robotyki i Mechatroniki brałem udział w serii badań owocujących publikacjami w materiałach pokonferencyjnych oraz czasopismach. W szczególności po raz pierwszy zastosowaliśmy lokalną filtrację modalną w strukturach płytowych [k15], z sukcesem przetestowaliśmy zaproponowany przeze mnie indeks pozwalający na odróżnianie wpływu temperatury od wpływu uszkodzeń [k16, c10] oraz wykonaliśmy obszerne porównanie i ocenę możliwości metody bazującej na lokalnej filtracji modalnej oraz metody bazującej na transformacie

falkowej [c11] do detekcji uszkodzeń w płytach w warunkach dużej zmienności temperaturowej. We wszystkich przedstawionych publikacjach byłem członkiem zespołu pomiarowego, wykonywałem analizę i interpretację danych oraz wykonywałem prace koncepcyjne – w szczególności w zagadnieniach filtracji temperaturowej i stosowania fuzji decyzji, co opisano w części poświęconej osiągnięciu.

7.4 Identyfikacja wymuszeń oraz kompensacji drgań nieznanych systemów

Zagadnienia związane ze sterowaniem stanowią jedną z podstawowych gałęzi automatyki i robotyki i wspierane są przez bogatą i dopracowaną teorię. Wciąż pozostają jednak w tym obszarze zagadnienia trudne, bez dedykowanych rozwiązań lub wymagające spełnienia szeregu dodatkowych założeń. Standardową procedurą przy okazji projektowania układu regulacji dla dowolnego układu mechanicznego jest jego początkowa identyfikacja, a następnie, w oparciu o znaleziony model układu (np. zdefiniowany w postaci funkcji przejścia), projektowany jest dedykowany regulator. Sytuacja znacznie się komplikuje w przypadku, gdy układ ulega zmianie w czasie (tzn. wymaga adaptacji regulatora), nie są znane wymuszenia zewnętrzne, procedura identyfikacji modelu nie może zostać przeprowadzona. W takich właśnie warunkach miało odbywać się aktywne adaptacyjne tłumienie drgań w założeniach projektu SONATA (2016/21/D/ST8/01678). W momencie rozpoczęcia projektu nie były znane żadne metody mogące rozwiązać tak zdefiniowany problem. W ramach projektu zaproponowałem opartą na koncepcji *Uczenia Ze Wzmocnieniem* (ang. *Reinforcement Learning*) metodę uczenia regulatorów i wykorzystałem ją do trenowania regulatorów proporcjonalno-różniczkujących, neuronowych, rozmytych, neuro-rozmytych i zespołowych. Wykazałem, że zaproponowana metoda wykorzystana do trenowania w.w. regulatorów pozwala na uzyskanie efektywnego przepisu na sterowanie tłumiące drgania oraz adaptację tego przepisu w przypadku zmian obiektu sterowania w czasie. Metoda może być zastosowana dla różnych ilości wejść i wyjść układu sterowania, nie wymaga wiedzy wstępnej o obiekcie kontrolowanym, nie wymaga „testowego” pobudzania układu oraz może być stosowana, gdy punkt przyłożenia siły korygującej i punkt w którym drgania należy wytłumić są od siebie oddalone. Opracowane metody zostały zweryfikowane w bogatym zestawie symulacji numerycznych oraz w ramach eksperymentów rzeczywistych na eksperymentalnej rekonfigurowalnej kratownicy widocznej na Rys. 9. W toku projektu ukazały się liczne publikacje poświęcone w.w. zagadnieniom: dotyczące sterowania drganiami [d8], wykrywania zmian strukturalnych na podstawie sterowania drganiami [k8, k14], we współpracy z M.Heesch sterowania drganiami w oparciu o *Model*

Predictive Control [k10]. Rezultaty projektu są również w trakcie publikowania na tzw. liście JCR. Dodatkowym efektem projektu było opracowanie wraz z K. Mendrokiem przeglądu poświęconego identyfikacji wymuszeń, m.in. na potrzeby sterowania obiektami mechanicznymi [d7].



Rys. 9 - Eksperymentalna kratownica wykorzystywana w ramach projektu SONATA

8. Lista referencji

W celu zachowania przejrzystości opisu, publikacje wchodzące w skład cyklu posiadają oznaczenie „c”, pozostałe publikacje z IF posiadają oznaczenie „d”, publikacje pokonferencyjne posiadają oznaczenie „k”

Lista publikacji wchodzących w skład cyklu

- [c1] P. Kohut, K. Holak, **Z. Dworakowski**, and T. Uhl, “Vision data employed for crack detection and localization,” *Diagnostyka - Appl. Struct. Heal. Usage Cond. Monit.*, vol. 3, no. 63, pp. 35–41, 2012.
- [c2] **Z. Dworakowski**, L. Ambrozinski, P. Packo, K. Dragan, T. Stepinski, and T. Uhl, “Application of Artificial Neural Networks for Damage Indices Classification with the Use of Lamb Waves for the Aerospace Structures,” *Key Eng. Mater.*, vol. 588, pp. 12–21, 2013.
- [c3] **Z. Dworakowski**, L. Ambrozinski, P. Packo, K. Dragan, and T. Stepinski, “Application of artificial neural networks for compounding multiple damage indices in Lamb-wave-based damage detection,” *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 22, pp. 50–61, 2015.
- [c4] **Z. Dworakowski**, P. Kohut, A. Gallina, K. Holak, and T. Uhl, “Vision-based algorithms for damage detection and localization in structural health monitoring,” *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 23, pp. 35–50, 2016.
- [c5] **Z. Dworakowski**, T. Stepinski, K. Dragan, A. Jablonski, and T. Barszcz, “Ensemble ANN Classifier for Structural Health Monitoring,” in *ICAISC 2016, Part I, Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 2, no. 9692, pp. 81–90.
- [c6] **Z. Dworakowski**, L. Ambrozinski, and T. Stepinski, “Multi-stage temperature compensation method for Lamb wave measurements,” *J. Sound Vib.*, vol. 382, pp. 328–339, 2016.
- [c7] **Z. Dworakowski**, K. Dragan, and T. Stepinski, “Artificial neural network ensembles for fatigue damage detection in aircraft,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 28, no. 7, pp. 851–861, 2016.
- [c8] J. Górski, A. Klepka, K. Dziedzic, J. Mrówka, R. Radecki, and **Z. Dworakowski**, “Identification of the stick and slip motion between contact surfaces using artificial neural networks,” *Nonlinear Dyn.*, 2020.
- [c9] **Z. Dworakowski**, K. Dziedzic, and A. Jabłoński, “A novelty detection approach to monitoring of epicyclic gearbox health,” *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 459–473, 2018.
- [c10] K. Mendrok, M. Bochenska, and **Z. Dworakowski**, “Effectiveness evaluation of the damage localization with a local spatial filtration under variable external conditions,” *Diagnostyka*, vol. 20, no. 1, pp. 55–61, 2019.
- [c11] **Z. Dworakowski**, K. Dziedzic, P. Zdziebko and K. Mendrok „Damage Detection in Plates with Use of Laser-Measured Mode Shapes”, *Shock and Vibration*, vol. 2020, Article ID 8858126, 2020

Lista publikacji nie wchodzących w skład cyklu

- [d1] K. Dragan, M. Dziendzikowski, A. Leski, **Z. Dworakowski**, and T. Uhl, “An Approach to Damage Detection in the Aircraft Structure with the Use of Integrated Sensors – The Symost Project,” *Fatigue Aircr. Struct.*, vol. 2012, no. 4, pp. 1–7, 2012.
- [d2] A. Jablonski, **Z. Dworakowski**, K. Dziedzic, and F. Chaari, “Vibration-based diagnostics of epicyclic gearboxes – From classical to soft-computing methods,” *Measurement*, vol. 147, p. 106811, 2019.
- [d3] K. Dziedzic, A. Jablonski, and **Z. Dworakowski**, “A novel method for speed recovery from vibration signal under highly non-stationary conditions,” *Measurement*, vol. 128, no. June, pp. 13–22, 2018.
- [d4] K. Dziedzic, A. Jablonski, and **Z. Dworakowski**, “Epicyclic gearbox fault detection by Instantaneous Circular Pitch Cycle Map,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 121, pp. 600–614, 2019.
- [d5] P. Kohut, A. Gąska, K. Holak, K. Ostrowska, J. Sładek, T. Uhl, **Z. Dworakowski**, “A structure’s deflection measurement and monitoring system supported by a vision system,” *Tech. Mess.*, vol. 81, no. 12, pp. 635–643, 2014.
- [d6] P. Kohut, K. Holak, **Z. Dworakowski**, and K. Mendrok, “Vision-based measurement systems for static and dynamic characteristics of overhead lines,” *J. Vibroengineering*, vol. 18, no. 4, pp. 2113–2122, 2016.
- [d7] K. Mendrok and **Z. Dworakowski**, “A review of methods for excitation force reconstruction,” *Diagnostyka*, vol. 20, no. 3, pp. 1–9, 2019.

- [d8] **Z. Dworakowski** and K. Mendrok, "Reinforcement learning for vibration suppression of an unknown system," *Mech. Mach. Sci.*, vol. 73, pp. 4045–4054, 2019
- [k1] **Z. Dworakowski**, K. Dziedzic, O. Graja, and A. Jablonski, "Speed extraction from vibration signal using ANNs and broadband features," in *11th International Workshop on Structural Health Monitoring*, 2017
- [k2] **Z. Dworakowski**, L. Ambrozinski, and T. Stepinski, "Data fusion for compensation of temperature variations in Lamb-wave based SHM systems," in *SPIE Smart Structures NDE*, 2015
- [k3] **Z. Dworakowski**, A. Jablonski, and P. Kijanka, "Diagnostic approaches for epicyclic gearboxes condition monitoring," in *8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)*, pp. 490–499, 2016
- [k4] **Z. Dworakowski**, K. Dragan, and T. Stepinski, "Lamb-wave-based monitoring of the aircraft during full-scale fatigue experiment - results and conclusions," in *8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)*, 2016, no. July 2016, pp. 5–8
- [k5] P. Kurowski, K. Mendrok, P. Kohut, and **Z. Dworakowski**, "Application of a vision system and FBG sensors for monitoring power lines," in *ICEDYN*, 2016
- [k6] A. Lis, **Z. Dworakowski**, and P. Czubak, "Anomaly detection approach for fan monitoring – An industrial case study," in *9th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2018*, 2018
- [k7] A. Jabłoński, K. Dziedzic, and **Z. Dworakowski**, "Selection of Suitable Method for Speed Recovery from Vibration Signal," in *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations*, 2017, pp. 103–110
- [k8] **Z. Dworakowski**, "Reinforcement-learning-based Identification of the System for the Purpose of Structural Change Detection," in *Structural Health Monitoring 2019: Enabling Intelligent Life-Cycle Health Management for Industry Internet of Things (IIOT) - Proceedings of the 12th International Workshop on Structural Health Monitoring, Volume 2*, pp. 3209–3216, 2019
- [k9] K. Mendrok, **Z. Dworakowski**, K. Holak, and P. Kohut, "Application of vision measurements for modal analysis of wires for the purpose of overhead transmission lines monitoring," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 842, no. 1, 2017.
- [k10] M. Heesch and **Z. Dworakowski**, "Neural Net Model Predictive Controller for Adaptive Active Vibration Suppression of an Unknown System," in *ICAISC 2019, Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol. 2, no. 11508, pp. 102–112
- [k11] P. Kijanka, A. Jablonski, K. Dziedzic, **Z. Dworakowski**, and T. Uhl, "Development of novel general equation for multistage epicyclic gearset with corrected teeth : non-constrained approach," *Proc. SPIE*, vol. 9806, pp. 1–8, 2016
- [k12] P. Kijanka, A. Jablonski, K. Dziedzic, **Z. Dworakowski**, and T. Uhl, "Development of novel general equation for multistage epicyclic gearset with corrected teeth : fixed-speed approach," *Proc. SPIE*, vol. 9805, pp. 1–8, 2016
- [k13] **Z. Dworakowski**, L. Ambrozinski, K. Dragan, T. Stepinski, and T. Uhl, "Voting Neural Network Classifier for Detection of Fatigue Damage in Aircrafts," in *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, pp. 1894–1901, 2014
- [k14] **Z. Dworakowski** and K. Mendrok, "Indirect structural change detection based on control algorithm's performance," in *9th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2018*, pp. 1–10, 2018
- [k15] **Z. Dworakowski**, L. Ambrozinski, and K. Mendrok, "Damage localization in plates with use of the procedure based on Modal Filtration," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 628, p. 012028, 2015
- [k16] **Z. Dworakowski**, K. Mendrok, „Ambient temperature effect elimination using local modal filters” VI World Conference on Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain, 2014



(podpis wnioskodawcy)

Zaświadczenie

W trakcie trwania projektu SYMOST o nr. LIDER/35/43/L-2/10/NCBiR/2011 pt. „Opracowanie systemu monitorowania stanu technicznego samolotu PZL ORLIK TC II w oparciu o wieloprzetwornikową sieć czujników PZT” część programu eksperymentalnego realizowano w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych (ITWL) w Warszawie. W eksperymentach osobisty udział brał dr inż. Ziemowit Dworakowski – zarówno na etapie akwizycji sygnałów jak i podczas ich przetwarzania i interpretacji. Praca dr inż. Ziemowita Dworakowskiego wykonana w ITWL zaowocowała serią publikacji zawierającą trzy wystąpienia konferencyjne oraz artykuł pt. „Artificial neural network ensembles for fatigue damage detection in aircraft” opublikowanym w czasopiśmie *Intelligent Materials Systems and Structures*, vol. 28, no. 7, pp. 851–861, 2016.

Dodatkowo poświadczam, że w ramach kierowanego przez dr. inż. Ziemowita Dworakowskiego projektu SYPIN o nr LIDER/3/0005/L-9/17/NCBR/2018 realizowana jest obecnie współpraca między AGH a ITWL obejmująca wykonanie programu badań eksperymentalnych na potrzeby projektu.

Kierownik Zakładu Zdatości do Lotu Statków Powietrznych
Płk dr hab. inż. Krzysztof Dragan, prof. ITWL

KIEROWNIK
ZAKŁADU ZDATNOŚCI DO LOTU
STATKÓW POWIETRZNYCH
Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych
płk dr hab. inż. Krzysztof DRAGAN

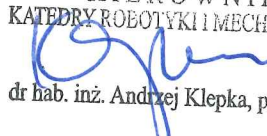
2020 -11- 09

Zaświadczenie

dr inż. Ziemowit Dworakowski brał udział w następujących projektach realizowanych przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie:

- **SONATA 2016/21/D/ST8/01678** pt. *"Inteligentne algorytmy sterowania adaptacyjnego w celu kompensacji drgań konstrukcji - jako kierownik projektu"*
- **LIDER/3/0005/L-9/17/NCBR/2018** pt. *"System automatycznego przetwarzania i interpretacji danych w monitorowaniu stanu struktur - jako kierownik projektu"*
- **LIDER/35/43/L-2/10/NCBiR/2011** pt. *"Opracowanie systemu monitorowania stanu technicznego samolotu PZL ORLIK TC II w oparciu o wieloprzetwornikową sieć czujników PZT"*
- **60/030/0027/11/Z/J** pt. *"Opracowanie innowacyjnej metodyki i informatycznego systemu zarządzania dla kodyfikacji linii kolejowych"*
- **SDZP GEKON1/02/214108/19/2014** pt. *"Dynamiczne zarządzanie zdolnościami przesyłowymi sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu innowacyjnych technik pomiarowych"*
- **PBS3/B6/21/2015** pt. *"Opracowanie modelu eksperymentalnego systemu oceny stanu technicznego hybrydowych przekładni obiegowych dużej mocy dla energetyki wiatrowej i górnictwa, pracujących w silnie zmiennych warunkach eksploatacyjnych"*
- **LIDER/26/0103/L-9/17/NCBR/2018** pt. *"System wizyjny do monitorowania stanu konstrukcji wykorzystujący algorytmy wzmacniania ruchu i deformacji"*
- **POIR Działanie 4.1, konkurs 2/4.1.4/2019** pt. *"Nowa era FTF dla systemów oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych - od urządzeń on-site do serwerów Industry 4.0"*

KIEROWNIK
KATEDRY ROBOTYKI I MECHATRONIKI


dr hab. inż. Andrzej Klepka, prof. AGH

Dziekan
Wydziału Inżynierii
Mechanicznej i Robotyki


Dr hab. inż. Krzysztof Mendrok, prof. AGH
(2)