

Załącznik 2A

Autoreferat

dr inż. Piotr Baniukiewicz
Katedra Zastosowań Informatyki
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, dnia 07.09.2015

AUTOREFERAT

1. **Imię i nazwisko:** Piotr Baniukiewicz

2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

- | | |
|------|---|
| 2001 | tytuł magistra inżyniera elektroniki i telekomunikacji – Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej |
| 2005 | stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika (z wyróżnieniem) – Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej; rozprawa pt. „Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji do identyfikacji niejednorodności materiałowych metodą wiroprądową”; promotor: prof. dr inż. Ryszard Sikora; recenzenci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Łobos, Politechnika Wrocławska oraz prof. dr hab. inż. Stanisław Gratkowski, Politechnika Szczecińska |

3. **Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.**

- | | |
|-------------|---|
| 2005 – 2012 | adiunkt w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Szczecińskiej (obecnie Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie) |
| od 2012 | adiunkt w Katedrze Zastosowań Informatyki Wydziału Elektrycznego Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie |

4. **Wskazanie osiągnięcia 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. nr 65, poz. 595 ze zm.)**

4.1. **Tytuł osiągnięcia naukowego**

Jako osiągnięcie w przewodzie habilitacyjnym przedstawiam cykl publikacji pod wspólnym tytułem: „**Wykrywanie i identyfikacja defektów materiałowych przy zastosowaniu wybranych metod badań nieniszczących**”

4.2. Osiągnięcie naukowe – monografia naukowa oraz cykl publikacji naukowych powiązanych tematycznie.

- I. Sikora R., **Baniukiewicz P.**, Reconstruction of crack profile using fuzzy logic, *Compel – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2006, 25(3), 616–626.

(10 pkt. MNiSW, seria indeksowana w Web of Science)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji zastosowania logiki rozmytej do identyfikacji profilu defektu, opracowaniu algorytmu rekonstrukcji wad, jego implementacji, przeprowadzeniu eksperymentów i interpretacji wyników oraz przygotowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 90%.

- II. Sikora R., Chady T., **Baniukiewicz P.**, Comparison of selected multifrequency eddy current systems, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2007, 894(26), 362–369.

(seria indeksowana w Web of Science - ISI Proceedings, 33rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Portland, USA, July 30–August 4, 2006)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współautorstwie koncepcji układu pomiarowego wykorzystującego modulację analogową sygnału wymuszenia, zaprojektowaniu oraz wykonaniu tego układu, przeprowadzeniu pomiarów metodą MF-FME i obróbce wyników dla tej metody, interpretacji wyników oraz przygotowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

- III. Chady T., **Baniukiewicz P.**, Sikora R., Analysis of complex differential eddy current transducer for deep flaws evaluation, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2009, 24(1-2), 61–68.

(IF=0.628, 10 pkt. MNiSW)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współautorstwie koncepcji symulacji numerycznych i ich wykonaniu, interpretacji wyników oraz przygotowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- IV. **Baniukiewicz P.**, Reconstruction of MIT images using sensitivity analysis and artificial neural networks, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2009, 85(8), 33–36.

(IF=0.196, 6 pkt. MNiSW)

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 100%.

- V. Palka R., Gratkowski S., Stawicki K., **Baniukiewicz P.**, The forward and inverse problems in magnetic induction tomography of low conductivity structures, *Engineering Computations*, 2009, 26(7–8), 843–856.

(IF=0.651, 20 pkt. MNiSW)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji rozwiązania zadanego problemu odwrotnego przy pomocy sztucznych sieci neuronowych, implementacji zaproponowanego rozwiązania, przeprowadzeniu eksperymentów i interpretacji wyników oraz przygotowaniu tekstu manuskryptu zamieszczonego w rozdziałach szóstym i siódmym. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- VI. Chlewicki W., **Baniukiewicz P.**, Chady T., Brykalski A., Identification of the position of objects in three dimensions using an extended radiography system, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012, 39(1–4), 167–173.

(IF=0.384, 15pkt MNiSW)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji rekonstrukcji położenia obiektów w przestrzeni trójwymiarowej na podstawie danych z tomografii liniowej, opracowaniu algorytmu rekonstrukcji i jego implementacji,

przeprowadzeniu części eksperymentów praktycznych i interpretacji uzyskanych wyników oraz na napisaniu odpowiadającej wkładowi części manuskryptu. Mój udział procentowy szacuję na 42%.

- VII. Chady T., Napierala L., **Baniukiewicz P.**, Sikora R., Detection of casting defects on radiogram pictures supported by approximation algorithms, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2010, 33(3-4), 1615–1621.

(IF=0.336, 20 pkt. MNiSW)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współautorstwie koncepcji zaawansowanego oprogramowania przetwarzającego zdjęcia radiograficzne, jego wykonaniu i optymalizacji pod systemy wieloprocesorowe oraz przygotowaniu tekstu manuskryptu zamieszczonego w rozdziale drugim. Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- VIII. **Baniukiewicz P.**, Automated defect recognition and identification in digital radiography, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, 33(3), 327–334.

(IF=1.462, 35 pkt MNiSW)

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 100%.

- IX. **Baniukiewicz P.**, *Sztuczna inteligencja w badaniach nieniszczących*, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 2015, ISBN 978-83-7663-188-2.

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 100%.

4.3. Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.3.1. Wprowadzenie – opis tematyki badawczej

Badanie nieniszczące (ang. *nondestructive testing*, NDT) jest procesem umożliwiającym przeprowadzenie analizy budowy wewnętrznej materiału bez zmian jego właściwości użytkowych. Dziedzina ta jest obecnie szeroko rozwijana, aby sprostać rosnącym wymaganiom dotyczącym jakości zarówno materiałów, jak i gotowych wyrobów. W zasadzie trudno wskazać gałąź przemysłu, która nie korzystałaby w jakimś stopniu z badań nieniszczących, a rozwój wielu branż przemysłowych, takich jak lotnictwo, kosmonautyka, energetyka jądrowa, wręcz nie byłby bez nich możliwy.

Badania nieniszczące dotyczą nie tylko procesów kontroli jakości; są prowadzone wszędzie tam, gdzie wymagane jest zbadanie składu lub budowy wewnętrznej danego obiektu. Przykładem mogą być bezcenne dzieła sztuki, takie jak: mumie, obrazy, freski, w przypadku których badania nieniszczące pomagają poznać ich wnętrze, potwierdzić autentyczność lub określić ich stan techniczny.

Wybór konkretnej metody zależy głównie od celu samego badania, badanego materiału oraz czynników ekonomicznych. Szczególnie popularne są metody elektryczne, szeroko wykorzystywane do testowania elementów metalowych. Analiza wyników pomiarów (wskazań) jest jednym z ważniejszych etapów w całym procesie badania. Poprawna interpretacja umożliwia wysunięcie daleko idących wniosków dotyczących kondycji próbki, a także podjęcie odpowiedniego działania w zależności od rodzaju znalezionej uszkodzenia.

Przez pojęcie sztucznej inteligencji (SI) rozumianych jest wiele algorytmów działających w sposób podobny do procesów przebiegających w organizmach żywych. Dziedzina ta obejmuje algorytmy, takie jak sztuczne sieci neuronowe (SSN), algorytmy genetyczne (AG), logikę rozmytą (ang. *fuzzy logic*, FL), różnego rodzaju klasyfikatory, oraz inne algorytmy ewolucyjne. Oczywiście nie należy przeceniać możliwości sztucznej inteligencji. Na obecnym etapie wciąż są to algorytmy numeryczne, realizowane na maszynach cyfrowych, którym daleko do inteligencji naturalnej. Niemniej jednak sztuczna inteligencja nadaje się do użycia wszędzie tam, gdzie istnieje potrzeba naśladowania działań człowieka w jakimś ograniczonym stopniu lub w przypadku, gdy postawiony problem nie może być zapisany w postaci analitycznej.

Często wskazania, które otrzymuje się w wyniku przeprowadzenia badania nieniszczącego, wymagają (poza nielicznymi wyjątkami) dalszego przetworzenia w celu uzyskania jednoznacznej informacji na temat stanu technicznego i kondycji badanego obiektu. Do tego zadania świetnie nadają się algorytmy SI, takie jak sztuczne sieci neuronowe czy logika rozmyta. W łatwy i intuicyjny sposób umożliwiają one przetworzenie (lub klasyfikację) wskazań badania nieniszczącego do postaci akceptowanej przez operatora systemu. Niewątpliwą zaletą takiego podejścia jest mniejsza złożoność numeryczna algorytmów SI w porównaniu do metod opartych o modelowanie analityczne układów pomiarowych. Ponadto algorytmy SI działają bezpośrednio na rzeczywistych danych pomiarowych, podczas gdy metody analityczne pomijają część zjawisk występujących w torze pomiarowym (np. szumów czy nieliniowości

elementów). Te cechy powodują, że możliwe jest stworzenie systemów automatycznej analizy danych pomiarowych, co przekłada się na większą niezawodność oraz wydajność procesu NDT.

Zastosowanie sztucznej inteligencji w badaniach nieniszczących oznacza także brak subiektywizacji w analizie wskazań w porównaniu do inspektora NDT. Ocena skuteczności działań inspektorów badań nieniszczących jest obiektem zainteresowania środowisk naukowych oraz przemysłowych. Prowadzone są analizy umożliwiające określenie wpływu tzw. czynnika ludzkiego, na jakość i wiarygodność badań. Przykładowo, eksperyment przeprowadzony na terenie Unii Europejskiej na grupie kilkudziesięciu inspektorów RT¹ wykazał, że w zakresie wykrywalności niezgodności spawalniczych średnia skuteczność sięga 80% i niewiele zależy od doświadczenia inspektora. Z kolei współczynnik fałszywych alarmów waha się od ok. 15% dla grupy z doświadczeniem powyżej 25 lat do ok. 25% dla grupy z doświadczeniem do pięciu lat. Znacznie ciekawsze są obserwacje wariacji w ramach poszczególnych testów lub grup inspektorów. Rozrzut w wynikach otrzymanych dla danego testu sięga nawet 20%, co jest doskonałym przykładem wspomnianego udziału czynnika ludzkiego oraz motywacją do automatyzacji procesu oceny. Nawet, jeśli system automatyczny nie osiągnie większej skuteczności średniej niż inspektor (co nawet nie jest konieczne, gdyż istniejące normy niejako biorą pod uwagę możliwości człowieka) to na pewno zniweluje dużą wariację w wynikach i zapewni powtarzalność samej oceny.

Generalnie algorytmy SI dokonują „ślepego” przetwarzania dowolnych danych wejściowych jedynie na podstawie ograniczonego zakresu wiedzy, mającego charakter szczegółowy i najczęściej dotyczącego przetwarzanych danych. Może to prowadzić do mylnego wniosku, że w zasadzie jeden system SI może być łatwo implementowany do analizy wskazań różnych metod NDT. Nie jest to do końca prawdą ze względu na specyfikę każdej z metod. Podstawowym pytaniem jest zawsze to, jakie dane chcemy przetwarzać czy jakie cechy wskazania danej metody NDT uznamy za najbardziej reprezentatywne dla naszych potrzeb. Dlatego, pomimo względnego podobieństwa, każdy system SI musi być analizowany i budowany oddzielnie, przy czym największą trudnością najczęściej jest przygotowanie sygnałów wzorcowych, które będą wykorzystane w procesie jego treningu.

4.3.2. Wybór i zakres obszaru badawczego

Przedstawiony do oceny dorobek stanowi podsumowanie prowadzonych przez mnie badań naukowych w dziedzinie defektoskopii. W swojej pracy skupiłem się na dwóch zasadniczych etapach procesu badania nieniszczącego, mianowicie na zwiększeniu prawdopodobieństwa wykrycia defektu w materiale poprzez modyfikację toru pomiarowego wybranej metody oraz na identyfikacji defektu i jego ocenie przy pomocy algorytmów sztucznej inteligencji. Oba te etapy odgrywają niezmiernie ważną i równorzędną rolę w badaniach nieniszczących, a ich rozwój niewątpliwie przyczynia się do zwiększenia niezawodności i automatyzacji całego procesu.

Praktycznymi aplikacjami szeroko pojętej sztucznej inteligencji w połączeniu z tematyką badań nieniszczących zająłem się już na początku swojej kariery naukowej. Moja rozprawa

¹ Fücsök F., Müller C., Scharmach M., Human factors: The NDE reliability of routine radiographic film evaluation, in: *15th World Conference on Nondestructive Testing*, Roma, Italy, October 15–21, 2002, www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn740/idn740.htm, access: 06.2014.

doktorska poświęcona była zastosowaniu systemów logiki rozmytej do analizy wskazań wieloczęstotliwościowej metody wiropądowej, celem identyfikacji i klasyfikacji niejednorodności materiałowych. Po obronie pracy doktorskiej kontynuowałem prace w tym kierunku, koncentrując się na zwiększaniu niezawodności badania nieniszczącego poprzez automatyzację procesu analizy jego wskazania [I, IV-IX] oraz optymalizację samego procesu pomiarowego [II, III]. Głównymi przyczynami, które skłoniły mnie do kontynuacji tej tematyki były wysoka praktyczna stosowalność opracowanych rozwiązań oraz dynamiczny rozwój, jaki dokonuje się w obszarze badań nieniszczących, powodowany głównie rosnącymi potrzebami różnych branż przemysłu ciężkiego.

Dziedzina badań nieniszczących charakteryzuje się bardzo dużą różnorodnością w zakresie stosowanych metod i badanych obiektów. Z tego też powodu w swojej pracy skupiłem się jedynie na trzech wybranych metodach NDT odniesionych do konkretnych zastosowań. Były to odpowiednio: metoda wiropądowa (ang. *eddy currents*, EC) w zastosowaniach do badań płyt metalowych [I-III, IX], metoda magnetycznej tomografii indukcyjnej (ang. *magnetic induction tomography*, MIT) w zastosowaniach do badań ośrodków słaboprzewodzących [IV, V, IX] oraz radiografia przemysłowa [VI-IX] (ang. *radiographic testing*, RT) stosowana w badaniach spoin czołowych. Metody wiropądowa i radiograficzna posiadają ugruntowaną pozycję w branży badań nieniszczących. Obie stosowane są na szeroką skalę na liniach produkcyjnych oraz w terenie.

Parametry defektu, takie jak jego kształt, położenie czy typ są istotnymi wskaźnikami pozwalającymi ocenić potencjalne zagrożenie lub przewidzieć dalszy rozwój zdarzeń. Dlatego też większość moich prac została poświęcona opracowaniu rozwiązań leżących w obszarze zagadnień odwrotnych, umożliwiających uzyskanie wspomnianych parametrów na podstawie wskazań wybranej metody. W przypadku metody wiropądowej parametrem był profil pęknięcia, dla magnetycznej tomografii indukcyjnej było to położenie i kształt wtrącenia a w przypadku radiografii typ i położenie niezgodności spawalniczej. Dodatkowo zająłem się także problemami związanymi z automatyczną oceną zdjęć radiograficznych wraz ze wszystkimi aspektami pobocznymi, takimi jak złożona segmentacja radiogramów czy rozpoznawanie znajdujących się na nich obiektów.

4.3.3. Omówienie osiągniętych wyników

Wynikiem prowadzonych przeze mnie prac jest cykl publikacji poświęcony trzem metodom badań nieniszczących: metodzie wiropądowej, metodzie tomografii indukcyjnej oraz metodzie radiograficznej. We wszystkich przypadkach celem nadrzędnym było opracowanie rozwiązań zwiększających prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości w badanym obiekcie, poprzez optymalizację procesu pomiarowego lub też poprzez implementację odpowiednich algorytmów analizy uzyskanych wskazań. Wszystkie badania były prowadzone w ramach licznych projektów badawczych krajowych jak i zagranicznych w których brałem udział. W szczególności należy wymienić tutaj granty badawcze:

- projekt badawczy „Sprzętowa realizacja wybranych układów defektoskopii wiropądowej”, nr 3T10A01430, Politechnika Szczecińska, 2006–2009, pod kierownictwem dr. hab. inż. Tomasza Chadego;
- zintegrowany projekt badawczy w ramach 6 programu ramowego „Opracowanie nowej technologii radiografii cyfrowej w celu przeprowadzenia zmian w tradycyjnie mniej

zaangażowanym w badania nieniszczące sektorze nadzoru przemysłowego, z radiografii klasycznej na zautomatyzowaną radiografię cyfrową”, 130/6.PRUE/2005/7, Politechnika Szczecińska, lata 2005–2009, pod kierownictwem prof. dr. inż. Ryszarda Sikory;

- projekt badawczy „Elektromagnetyczna tomografia niskiej częstotliwości słaboprzewodzących struktur technicznych i biologicznych”, nr 3T10A03330, Politechnika Szczecińska, lata 2006–2009, pod kierownictwem prof. dr. hab. inż. Stanisława Gratkowskiego;
- projekt rozwojowy własny „Inteligentny system analizy radiogramów”, nr NR01003706/2009, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, lata 2009–2012, pod kierownictwem prof. dr. inż. Ryszarda Sikory;
- projekt rozwojowy własny „Identyfikacja niejednorodności strukturalnych układów mechanicznych”, nr NN501114136, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, lata 2009–2012, pod kierownictwem dr. inż. Wojciecha Chlewickiego.

4.3.3.1. Metoda prądów wirowych [I-III]

Metoda prądów wirowych umożliwia wykrywanie powierzchniowych i podpowierzchniowych defektów występujących w materiałach przewodzących prąd elektryczny. Szczególnie istotna jest tu możliwość ujawnienia groźnych pęknięć zmęczeniowych wychodzących na powierzchnię obiektów, łącznie z pęknięciami poprzecznymi, które są generalnie ciężko wykrywalne innymi metodami. Podstawowe parametry metody, takie jak czułość i rozdzielczość mocno zależą od konstrukcji przetwornika pomiarowego oraz od rodzaju zastosowanego zasilania przetwornika. W tym obszarze istnieje możliwość optymalizacji parametrów systemów pomiarowych, tak aby otrzymać systemy o określonej charakterystyce [III] lub dedykowane do konkretnych zastosowań [II, III]. Metoda prądów wirowych z powodzeniem jest także stosowana do wykrywania nieciągłości podpowierzchniowych oraz leżących głęboko w materiale. W tym celu stosuje się jej odmianę – metodę wiropądową wieloczęstotliwościową (ang. *Multifrequency Excitation Spectrogram System*, MFES) wykorzystującą zależność standardowej głębokości wnikania prądów wirowych od ich częstotliwości [II, III]. W tej metodzie przetwornik zasilany jest przebiegiem złożonym z odpowiednio dobranych harmonicznych o znanych amplitudach, a następnie dokonuje się analizy sygnału wyjściowego z cewek pomiarowych przetwornika pod kątem zmian tych amplitud. Pewną wadą tego rozwiązania jest jego większe skomplikowanie zarówno od strony układu pomiarowego jak i od strony przetwarzania uzyskanych wyników. Zaletą z kolei jest możliwość określenia głębokości na jakiej znajduje się defekt oraz możliwość rekonstrukcji jego profilu [I].

Rekonstrukcja profilu defektu przy pomocy algorytmów sztucznej inteligencji [I]

Większość problemów odwrotnych, opartych na rzeczywistych wynikach pomiarów, nie spełnia wymogów stawianym zagadnieniom teoretycznym, dotyczącym stabilności i jednoznaczności rozwiązania. Powoduje to, że rozwiązanie analityczne czy nawet numeryczne takiego problemu dotyczy jedynie wybranych przypadków, najczęściej bardzo uproszczonych i znacznie odbiegających od układów rzeczywistych. Za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji można z powodzeniem stworzyć model całego układu pomiarowego (prosty lub odwrotny) i wykorzystać go do rozwiązania problemu odwrotnego.

Przez problem odwrotny można rozumieć proces wyznaczania wektora parametrów \mathbf{p} opisujących obiekt, gdy znane są wyniki pomiarów \mathbf{o} tego obiektu. W przypadku badań nieniszczących poprzez parametry obiektu rozumie się najczęściej sformalizowany opis jego struktury wewnętrznej, w szczególności jej zaburzeń będących defektami. Sam proces badania nieniszczącego za pomocą określonej metody pomiarowej może być traktowany jako przekształcenie przestrzeni parametrów do przestrzeni wyników, co można zapisać w uproszczonej postaci:

$$\Gamma(\mathbf{p}) = \mathbf{o} \quad (1)$$

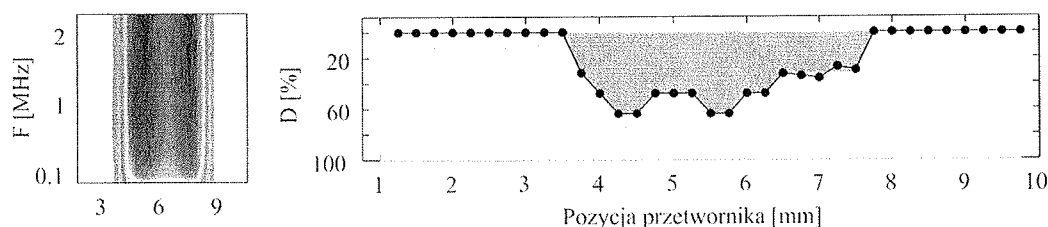
Funkcja Γ rzadko kiedy jest wyznaczana analitycznie, co uniemożliwia obliczenie funkcji odwrotnej Γ^{-1} (najczęściej $\det \Gamma(\mathbf{p}) \cong 0$), a tym samym rozwiązanie problemu odwrotnego. W rzeczywistości funkcja Γ jest modelowana poprzez wzajemne oddziaływanie badanego materiału oraz systemu pomiarowego, a także poprzez sam system pomiarowy i procesy przetwarzania sygnałów w nim zachodzące. Taki układ jako całość może być traktowany jak „czarna skrzynka”, w której zachodzą pewne operacje, skutkiem których jest sygnał pomiarowy \mathbf{o} . Dokonując pomiarów próbek wzorcowych (\mathbf{o} znanej budowie wewnętrznej) można modelować funkcję odwrotną Γ^{-1} , a następnie używać takiego modelu do obliczania nieznanymi parametrów obiektu na podstawie jego pomiarów \mathbf{o} . W tym zadaniu szeroko stosuje się modelowanie za pomocą sztucznych sieci neuronowych². Takie podejście jednak nie jest pozbawione wad. Głównym problemem jest relatywnie duża złożoność modelu (znacząca liczba neuronów oraz co najmniej dwie warstwy sieci ze wsteczną propagacją błędów) a co za tym idzie czasochłonny i mało stabilny proces treningu oraz wysoka podatność takiego modelu na przetrenowanie, co wiąże się z utratą zdolności uogólniania.

Skończona czułość rzeczywistego przetwornika pozwala na jednoczesną analizę tylko małego fragmentu wyników pomiarowych – w zakresie $\Delta R - x_o \leq x_o \leq \Delta R + x_o$, gdzie x_o jest aktualnym punktem pomiarowym, w którym estymowany jest kształt wady, a ΔR oznacza promień czułości przetwornika pomiarowego, będący parametrem konstrukcyjnym [I, IX]. W praktyce oznacza to, że w danej chwili analizie poddawany jest jedynie mały wycinek uzyskanych danych pomiarowych. Pojemność okna przetwarzania zależy od promienia czułości przetwornika pomiarowego i w rzeczywistości odnosi się do określonej liczby punktów pomiarowych sąsiadujących z punktem x_o . Ma też bezpośredni wpływ na liczbę wejść systemu sztucznej inteligencji a tym samym na złożoność całego modelu.

Tak przyjęty sposób modelowania funkcji Γ^{-1} powoduje potrzebę przetwarzania dużej liczby danych, a zatem stawia poważne wymagania co do złożoności całego układu SI. Zaproponowany w pracy [I] system logiki rozmytej posiada strukturę zbliżoną do struktury sieci ANFIS lub sztucznych sieci neuronowych przy czym zastosowany algorytm treningu jest znacznie prostszy i mniej wymagający sprzętowo. Algorytm jest kontrolowany jedynie przez dwa zewnętrzne parametry. Są to odpowiednio liczba funkcji przynależności przypisanych do każdego wejścia oraz stopień nakładania się na siebie sąsiednich funkcji przynależności. Oba parametry mają znaczenie fizyczne i odpowiadają odpowiednio za dyskretyzację danych treningowych (czyli rozdzielczość) oraz za czułość systemu. Ponadto liczba funkcji przynależności może być dobrana automatycznie za pomocą analizy skupień – podziału zbioru

² Elshafiey, I., L.I. Udpa, and S.S. Udpa, Application of neural networks to inverse problems in electromagnetics. IEEE Transactions on Magnetics, 1994. 30(5): p. 3629–3632.

treningowego na klastry. Modelowana jest bezpośrednio funkcja Γ^{-1} . Sygnałem wejściowym systemu FL są dane pomiarowe, sygnałem wyjściowym z modelu jest zestaw parametrów opisujących kształt wady. W rezultacie opracowany system oparty o FL modelujący cały tor pomiarowy jest łatwiejszy do implementacji niż sztuczne sieci neuronowe oraz oferuje znacznie prostszy i bardziej przewidywalny proces uczenia. Przykładowy wynik identyfikacji przedstawiono na Ryc. 1.



Ryc. 1. Przykład identyfikacji profilu wady na podstawie spektrogramu.

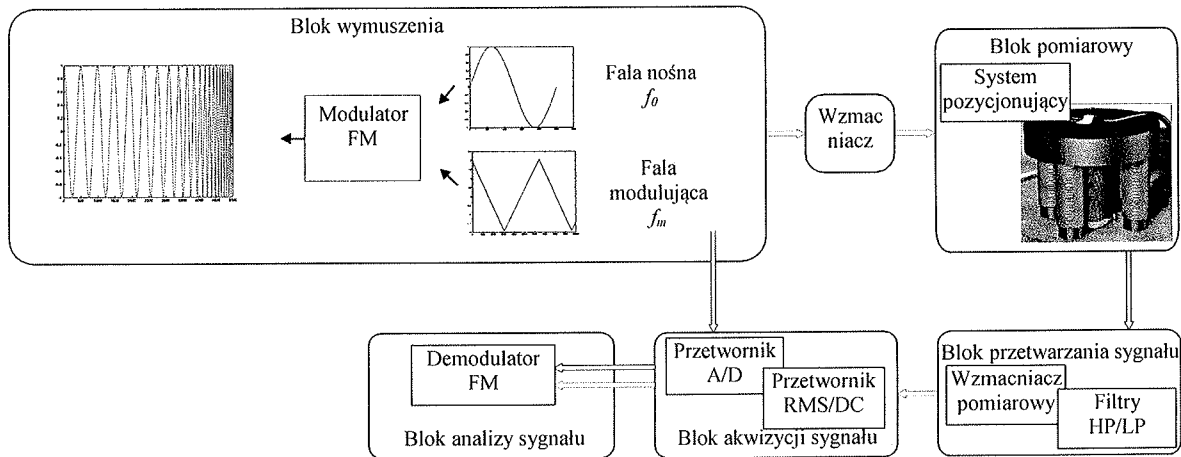
Zwiększenie możliwości pomiarowych układu MFES poprzez modyfikację toru pomiarowego [III]

W typowym układzie MFES sygnał wymuszenia generowany jest w programowalnym generatorze przebiegów, jako złożenie wielu składowych sinusoidalnych. Liczba harmonicznych oraz ich częstotliwości zależą od badanego materiału oraz rodzaju defektów w nim występujących. Parametry te mają wpływ na dokładność wyznaczania głębokości na jakiej znajduje się defekt oraz na dokładność rekonstrukcji jego profilu.

Zasadniczą wadą takiego rozwiązania jest jego względnie mała przenośność spowodowana potrzebą stosowania programowalnego generatora oraz potrzebą analizy widmowej wyników pomiarów (najczęściej przy pomocy szybkiej transformaty Fouriera). Drugi problem częściowo został rozwiązany w pracy „*Portable system for eddy current inspection using multifrequency method*”³, gdzie zaproponowano sprzętowy układ oparty o procesor DSP, dokonujący analizy widmowej sygnału pomiarowego.

W pracy [II] omówiono zmodyfikowany układ MFES wykorzystujący modulator częstotliwości do uzyskania fali zasilającej przetwornik pomiarowy, zamiast programowalnego generatora przebiegów. Schemat blokowy układu MF-FME (ang. *multifrequency – frequency modulated excitation system*) przedstawiono na Ryc. 2.

³ Chady T., Baniukiewicz P., Sikora R., Portable system for eddy current inspection using multifrequency method, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, 2009, (12), 140–145.



Ryc. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego MF-FME.

Fala nośna sinusoidalna f_0 , zasilająca przetwornik jest modulowana przez falę trójkątną, która powoduje okresową i liniową zmianę jej częstotliwości w zakresie ok. $\pm 58\%$ częstotliwości f_0 . Amplituda sygnału wyjściowego z przetwornika jest mierzona w sposób ciągły przez przetwornik RMS/DC, charakteryzujący się krótkim czasem pomiaru. Po odpowiedniej synchronizacji modulatora z blokiem akwizycji sygnału, uzyskuje się amplitudę odpowiedzi przetwornika odpowiadającą konkretnej częstotliwości wymuszającej, obliczonej na podstawie amplitudy przebiegu modulującego.

Zastosowanie modulatora częstotliwości umożliwiło miniaturyzację układu pomiarowego, co przełożyło się na jego stosowalność w terenie. Ponadto tak zrealizowany system generowania wymuszenia przetwornika gwarantuje teoretycznie nieskończoną rozdzielczość w zakresie widma częstotliwościowego (a w praktyce zależną od częstotliwości próbkowania przetwornika A/D oraz częstotliwości sygnału modulującego), co ma pozytywny wpływ na szacowanie głębokości, na jakiej znajduje się defekt oraz na dokładność rekonstrukcji jego profilu. Rezygnacja z przetwarzania sygnału pomiarowego za pomocą szybkiej transformaty Fouriera znacznie (nawet czterokrotnie) zredukowała czas pomiaru, szczególnie w przypadku zasilania przetwornika prądami o niskich częstotliwościach, stosowanymi przy badaniach na przykład elementów aluminiowych. Analiza porównawcza układu MFES i MF-FME wykazuje, że układ z modulacją częstotliwościową może z powodzeniem zastąpić bardziej skomplikowany i droższy układ MFES, zapewniając przy tym lepsze parametry użytkowe.

Optymalizacja punktu pracy złożonego przetwornika MFES celem osiągnięcia wysokiej czułości i rozdzielczości w stosunku do defektów podpowierzchniowych [III]

Większość defektów występujących w płytach metalowych (na przykład będących elementami poszycia kadłuba samolotu) ma charakter pęknięć zmęczeniowych. Wykrycie takiego defektu metodami elektromagnetycznymi jest relatywnie proste, ale oszacowanie głębokości pęknięcia może już przysparzać problemów. Dla tego celowe jest projektowanie dedykowanych przetworników umożliwiających dokładną lokalizację pęknięć znajdujących się zarówno od strony przetwornika pomiarowego jak i przeciwnej oraz umożliwiających określenie ich głębokości.

Złożony przetwornik wiroprowodowy zaprezentowany w pracy [III] został zaprojektowany do wykrywania defektów w grubych (>30 mm) płytach aluminiowych. Całościowo, omawiany układ składał się z dwóch oddzielnych przetworników o różnej wielkości (BP i SP) i

umieszczonych jeden w drugim. Odpowiednie zasilanie obu przetworników przy różnicowym połączeniu ich cewek pomiarowych umożliwiło modelowanie czułości i rozdzielczości całego układu zarówno w stosunku do defektów powierzchniowych jak i podpowierzchniowych.

Przeprowadzona optymalizacja punktu pracy całego przetwornika miała na celu zwiększenie dokładności wykrywania i rozróżniania płytkich pęknięć znajdujących się po przeciwnej stronie materiału względem przetwornika. Optymalizowanym parametrem był stosunek prądów I_b i I_s zasilających cewki wymuszające przetworników BP i SP. Na podstawie symulacji numerycznych wykazano, że optymalny dla uzyskania wysokiej czułości układu stosunek tych prądów dla rozpatrywanej próbki mieści się w zakresie 1 – 1.2 w zależności od wybranej częstotliwości pomiarowej. Uzyskane wyniki potwierdzono badaniami praktycznymi układu⁴, które wykazały ponadto prawie liniową zależność szczytowej wartości sygnału pomiarowego od głębokości wady, co umożliwia szybkie szacowanie głębokości defektu na podstawie sygnału pomiarowego.

4.3.3.2. Magnetyczna tomografia indukcyjna [IV, V]

Metoda magnetycznej tomografii indukcyjnej jest stosunkowo młoda, a jej praktyczne zastosowanie upatruje się w medycynie, jako metodę do obrazowania mózgu, wylewów krwi lub zmian w narządach wewnętrznych. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego w tomografii MIT i otrzymanie tym samym rozkładu konduktywności w badanym obiekcie jest procesem trudnym i złożonym obliczeniowo. Rozwiązania analityczne dla prostych układów pomiarowych są znane, jednak nie oferują one tak wysokiej funkcjonalności jak metody odwrotne oparte o algorytmy sztucznej inteligencji (podobnie jak to miało miejsce w przypadku metody prądów wirowych).

Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji do rekonstrukcji rozkładu konduktywności w materiale [IV, V]

W pracach [IV, V] rozpatrywane były dwa rodzaje układów pomiarowych – symetryczny cylindryczny [IV] oraz prostopadłościenny [V]. W obu przypadkach celem badań było opracowanie wydajnych metod rekonstrukcji rozkładu konduktywności wewnątrz zbiorników wypełnionych słaboprzewodzącą cieczą oraz zawierających nieprzewodzące prądu elektrycznego wtrącenia.

W pracy [IV] wykorzystano analizę wrażliwością⁵ połączoną z algorytmem iteracyjnym do identyfikacji położenia wtrąceń – walców wykonanych z pleksiglasu wewnątrz cylindrycznego zbiornika wypełnionego solanką o konduktywności $\sigma=0.8$ S/m. Cechą charakterystyczną tego podejścia było wykorzystanie tzw. numerycznego modelu prostego układu pomiarowego do sformułowania macierzy wrażliwości, ujmującej wpływ zmian konduktywności każdego wtrącenia na sygnał pomiarowy, dla różnych położenia cewki wymuszającej. Celem skrócenia czasu potrzebnego na sformułowanie macierzy wrażliwości zaproponowano realizację modelu prostego za pomocą systemu sztucznych sieci neuronowych, z których każda aproksymowała sygnał wyjściowy z jednej cewki detekcyjnej na podstawie zadanego rozkładu konduktywności

⁴ Chady T., Baniukiewicz P., Sikora R., Psuj G., Evaluation of complex multifrequency eddy current transducer designed for precise flaw depth measurements, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, 2008, (11), 283–287.

⁵ Baniukiewicz P., Reconstruction of conductivity distribution in low conductive materials using magnetic induction tomography and adjoint model, *Computer Field Models of Electromagnetic Devices*, 2010, 897–904.

w zbiorniku. Aby zminimalizować błędy aproksymacji wprowadzono współczynnik jakości Q , na podstawie którego oceniano czy odpowiedź układu pomiarowego na dany rozkład konduktywności może być uzyskana z systemu SSN, czy musi być obliczona za pomocą numerycznego modelu prostego. Opracowana metoda pozwoliła na redukcję czasu obliczeń o 30%.

Nieco inne podejście zaproponowano w pracy [V], gdzie rekonstrukcja rozkładu konduktywności wewnątrz zbiornika prostopadłościennego była dokonywana bezpośrednio za pomocą sztucznej sieci neuronowej, która stanowiła model odwrotny całego fizycznego układu pomiarowego, podobnie jak to zostało opisane w punkcie 4.3.3.1. Zakładając płaszczyznę pomiaru $y-z$, rekonstrukcja polegała na określeniu rozkładu konduktywności w osi x dla wybranego punktu pomiarowego $P(y,z)$. Objętość zbiornika poddana została dyskretyzacji na woksele o stałej konduktywności. Każdy woksel opisany był dwoma parametrami – położeniem na osi x oraz długością. Przekrój poprzeczny zawsze był kwadratowy. Obydwa parametry były uzyskiwane z wyjścia sztucznej sieci neuronowej na podstawie fragmentu wyników pomiarowych odpowiadającemu promieniowi czułości zastosowanego przetwornika. Położenie wokseli w płaszczyźnie pomiaru $y-z$ odpowiadało kolejnym punktom pomiarowym $P(y,z)$. Niewątpliwą zaletą tej metody jest to, że podobnie jak w przypadku metody wiroprowadowej do poprawnego rozwiązania postawionego zadania odwrotnego nie jest potrzebna dokładna analityczna definicja procesów zachodzących w trakcie pomiarów. Ponadto proces rekonstrukcji jest bardzo szybki i skuteczny.

4.3.3.3. Metoda radiograficzna [VI-IX]

Metoda radiograficzna (RT) jest jedną z najstarszych, a co za tym idzie najlepiej poznanych metod badań nieniszczących. Wraz z rozwojem technik komputerowych oraz metod akwizycji obrazów rentgenowskich, opartych o płyty obrazowe lub przetworniki bezpośrednie, metoda ta przeżywa swoją drugą młodość. W praktycznym zastosowaniu, jedną z wad tej metody jest relatywnie długi czas potrzebny na wykonanie analizy wskazania, która na dodatek musi być przeprowadzona przez wykwalifikowanego operatora. Ze względu na naturę obrazów, jakie otrzymywane są w wyniku badania, ocena często ma charakter subiektywny i może podlegać wpływom stanu psychofizycznego radiologa. Jeśli weźmie się także pod uwagę dużą liczbę zdjęć radiograficznych wykonywanych podczas badania obiektu (w przemyśle stoczniowym – kilka tysięcy) to próba automatyzacji procesu oceny radiogramu i eliminacji czynnika ludzkiego jest uzasadniona. Próby stworzenia działającego w praktyce systemu do oceny zdjęć radiograficznych są podejmowane na świecie od około dziesięciu lat. Jednakże na chwilę obecną w literaturze przedmiotu nie znajduje się żadnego w pełnego rozwiązania obejmującego wszystkie aspekty przetwarzania i analizy radiogramów. Brak jest również rozwiązań komercyjnych.

Koncepcja inteligentnego eksperta, przeprowadzającego automatyczną ocenę połączeń spawanych metali, obejmuje opracowanie automatycznego systemu komputerowego wspomagającego pracę inspektora NDT lub wręcz go zastępującego. Tego rodzaju system pozwoliłby na znaczną redukcję czasu i kosztów inspekcji. Nie mniejsze znaczenie ma obiektywizacja procesu oceny i co za tym idzie uzyskanie jego powtarzalności. Automatyczna analiza radiogramów jest procesem bardzo złożonym, obejmującym zastosowanie technik z zakresu analizy i oceny obrazów oraz klasyfikacji i eksploracji danych. Spowodowane jest to specyfiką samych zdjęć rentgenowskich oraz poszukiwanych na nich obiektów. Ponadto cały