

Autoreferat

**przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych,
w szczególności określonych w 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.)**

Szymon W. Gontarz

Instytut Pojazdów
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych
Politechnika Warszawska

Warszawa 2016

Spis treści

1. Imię i Nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	3
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.).....	5
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego.....	5
4.2. Wyszczególnienie pozycji osiągnięcia naukowego.....	6
4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich potencjału do wykorzystania.....	8
4.3.1. Wprowadzenie.....	8
4.3.2. Omówienie osiągniętych wyników w zakresie badań nad efektami magnetomechanicznymi dla materiałów magnetycznie miękkich.....	11
4.3.2.1 Metodyka badań.....	12
4.3.2.2 Magnesowanie naprężeniowe.....	15
4.3.2.3 Zjawiska magnetomechaniczne.....	18
4.3.2.4 Histereza.....	24
4.3.3. Omówienie osiągniętych wyników w zakresie badań nad konstrukcjami oraz pojazdami... ..	27
4.3.3.1 Konstrukcje.....	27
4.3.3.2 Pojazdy.....	29
4.3.4. Wykorzystanie wyników pracy naukowo-badawczej.....	35
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.....	39
5.1. Badanie i modelowanie wpływu technologii obróbki stali na jej właściwości magnetyczne.....	39
5.2. Wykorzystanie metod magnetycznych w systemach par ultra-nadkrytycznych oraz układach kogeneracyjnych.....	41
5.3. Metody wibroakustyczne w diagnostyce maszyn.....	43
5.4. Badania w warunkach polarnych.....	45
6. Podsumowanie dorobku naukowego.....	45

1. Imię i Nazwisko.

Szymon Wojciech Gontarz

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej.

Stopień naukowy: Doktor nauk technicznych (uzyskany z wyróżnieniem Rady Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych PW oraz nagrodzony przez Rektora Politechniki Warszawskiej).

Dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn.

Jednostka: Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.

Temat pracy: Informacja aprioryczna jako kryterium adaptacji systemów sensorycznych oraz metod analizy sygnałów w wykrywaniu uszkodzeń.

Data nadania: 21.12.2011r.

Promotor: Prof. dr hab. inż. Stanisław Radkowski

Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

Politechnika Warszawska

Recenzenci: Prof. dr hab. Czesław Cempel

czł. koresp. PAN, dr hab. c. mult.

czł. Akademii Inżynierskiej w Polsce

Instytut Mechaniki Stosowanej - *Politechnika Poznańska*

Prof. nzw. dr hab. inż. Wiesław Grzesikiewicz

Instytut Pojazdów - *Politechnika Warszawska*

Tytuł: Magister inżynier - otrzymany z wynikiem celującym

Kierunek / specjalizacja: Mechanika i Budowa Maszyn w zakresie diagnostyka i bezpieczeństwo, indywidualny program studiów, ukończone równoległe roczne studium: Międzywydziałowe Studium Ubezpieczeń Systemów Technicznych, stypendium naukowe przez cały okres studiowania.

Jednostka: Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych *Politechniki Warszawskiej*

Temat pracy: Zastosowanie metody redukcji efektów zjawiska Dopplera w stacjonarnym stanowisku diagnostycznym.

Data obrony: lipiec 2004r.

Promotor: Prof. dr hab. inż. Stanisław Radkowski

Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych

Politechnika Warszawska

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

A. **Okres zatrudnienia:** od 01.10.2012 r.

Pracodawca: Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, *Politechnika Warszawska*, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa.

Stanowisko: adiunkt (pełen etat)

Obowiązki:

Przygotowanie tematyki i prowadzenie wykładów z:

- Podstawy diagnostyki;
- Diagnostyka Maszyn;
- Wprowadzenie do mechatroniki;
- Mechatronika Pojazdów;
- Wprowadzenie do przetwarzania obrazów.

Przygotowanie instrukcji wykonywania i prowadzenie ćwiczeń w:

- Laboratorium Mechatroniki Pojazdów;
- Laboratorium Mechatronicznych Systemów Sensorycznych i Wykonawczych;
- Laboratorium Podstaw Diagnostyki;
- Laboratorium Inżynierii Programowania;
- Laboratorium Układów elektronicznych w systemach sterowania i regulacji.

Prowadzenie badań naukowych z udziałem studentów/doktorantów w ramach ich pracy naukowej.

Pełnienie funkcji promotora prac dyplomowych zgodnych ze swoją specjalnością oraz z uwzględnieniem zasad obowiązujących w danej jednostce.

Udział w realizacji projektów naukowo-badawczych realizowanych przez Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytutu Pojazdów, Politechniki Warszawskiej we współpracy z innymi instytucjami naukowymi oraz przedstawicielami przemysłu.

Prowadzenie badań z zakresu analizy wibroakustycznej, bezpieczeństwa systemów technicznych, materiałów magnetycznie miękkich, przetwarzania i analiz sygnałów oraz nieinwazyjnych metod diagnostyki technicznej.

Rozwijanie pasywnych metod magnetycznych ukierunkowanych na wykorzystanie w przemyśle energetycznym oraz na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa.

B. Okres zatrudnienia: 01.11.2011 r. – 01.10.2012 r.

Pracodawca: Wydział Samochodów i maszyn roboczych, Instytut Pojazdów, Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa.

Stanowisko: asystent (pełen etat)

Obowiązki: Opracowanie pomocy naukowych i popularyzacja wiedzy:

Uaktualnienie treści wykładów z:

- Wprowadzenie do mechatroniki;
- Przygotowanie wykładów: Wprowadzenie do przetwarzania obrazów;
- Podstawy diagnostyki;
- Diagnostyka maszyn;
- Laboratorium podstaw diagnostyki.

Prowadzenie badań naukowych w zespole badawczym Instytutu Pojazdów.

Pełnienie funkcji promotora prac dyplomowych zgodnych ze swoją specjalnością oraz z uwzględnieniem zasad obowiązujących w danej jednostce.

C. Okres zatrudnienia: 14.01.2005 r. – 13.07.2005 r.

Pracodawca: City University of Hong Kong, Manufacturing Engineering & Engineering Management, Smart Engineering Asset Management Laboratory (SEAM),

Stanowisko: Senior Research Assistant (*starszy asystent naukowy*)

Obowiązki: praca naukowa w ramach projektu narodowego: Hong Kong, China, Projekt nr 7001808, nad metodami sztucznej inteligencji w analizie i przetwarzaniu sygnałów, ukierunkowanej na wczesne wykrywanie uszkodzeń;

- rozwijanie inteligentnego systemu wspierania eksploatacji (Smart Asset Maintenance System - SAMS) do zarządzania i monitorowania stanu technicznego maszyn;
- asystent w Smart Engineering Asset Management Laboratory;
- praca w zespole Smart Engineering Asset Management Laboratory, ściśle współpracującym z przemysłem energetycznym, transportowym oraz budowlanym (spotkania z przedstawicielami przemysłu, wstępne badania identyfikujące problemy techniczne, pomiary na obiektach rzeczywistych, analiza wyników pomiarów).

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:

Moim osiągnięciem naukowym, stanowiącym znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej Budowa i eksploatacja maszyn, jest cykl publikacji powiązanych tematycznie pod wspólnym tytułem:

Analiza zjawisk magnetomechanicznych oraz elektromagnetycznych w ziemskim polu magnetycznym w badaniu konstrukcji i maszyn.

4.2. Wyszczególnienie pozycji osiągnięcia naukowego.

Cykl publikacji powiązanych tematycznie, tworzących wskazane osiągnięcie, składa się z 12 prac, w tym 6 publikacji w czasopismach rejestrowanych przez bazę Journal Citation Reports (JCR) posiadających Impact Factor (IF), 5 rozdziałów w książkach, 2 patentów oraz 1 wdrożenia.

P01 - Gontarz Sz., Radkowski S.: *Impact of different factors on relationship between stress and eigenmagnetic field in steel specimen.* IEEE Transactions on Magnetics Vol. 48, Issue 3, 1143-1154, 2012.

IF(5-letni): 1.328, IF (2015): **1.277**, Punkty MNiSW (2015): **25 pkt.** (lista A, Web of Science, JCR)

Udział habilitanta w przygotowaniu publikacji: **80%**

P02 - Gałęzia A, Gontarz Sz., Jasiński M., Mączak J., Radkowski S., Seńko J.: *Distributed system for monitoring the large scale infrastructure structures based on changes analysis of its static and dynamic properties.* Key Engineering Materials. Vol. 518, 2012, pp 106-118, 2012.

Punkty MNiSW: **8 pkt.** (posiadał IF(2010)=0,23 i 20 pkt.) - lista A/B

Udział habilitanta w przygotowaniu publikacji: **17%**

P03 - Monografia pod redakcją Jacka Dybały i Stanisława Radkowskiego (2012): *Wykorzystanie wieloźródłowej informacji w proaktywnej strategii eksploatacji.* Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, ISBN 978-83-7789-035-6, Warszawa-Radom 2012. **Książka wyróżniona Nagrodą Rektora PW.**

Szymon Gontarz, autor dwóch rozdziałów:

- *Akwizycja informacji na potrzeby zarządzania systemem transportowym.*
- *Monitoring magnetyczny pojazdów.*

Udział habilitanta w przygotowaniu obu publikacji wynosi **100%**.

P04 - Szymon Gontarz, Stanisław Radkowski, Jędrzej Mączak, Jacek Dybała, Marcin Jasiński, Robert Gumiński, Krzysztof Rokicki, patent pt.: „*Sposób określania stanu wyężenia materiału na podstawie histerezy magnetomechanicznej*”. **Patent** nr: PL400217-A1, numer akcesji: DIIDW:2014M35534. Rok przyznania 2014.

Udział habilitanta w przygotowaniu patentu: **65%**

P05 - **Gontarz Sz.**, Szulim P., Seńko J., Dybała J.: *Use of magnetic monitoring of vehicles for proactive strategy development*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 52, 102-115, 03/2015.

IF(5-letni): 3.631, IF (2015): **3.075**, Punkty MNiSW (2014): **45 pkt.** (lista A, Web of Science, JCR)

Udział habilitanta w przygotowaniu publikacji: **70%**

P06 - Książka pokonferencyjna (zindeksowana w WoS), anglojęzyczna pod redakcją: Peter W. Tse, Joseph Mathew, King Wong, Rozky Lam, C.N. Ko (2015). *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Engineering Asset Management – Systems, Professional Practices and Certification*. Springer ISBN 978-3-319-09506-6.

Gontarz Szymon, współautor dwóch rozdziałów:

Gontarz Sz., Radkowski S.: *Diagnostic Model of Hysteresis for Condition Monitoring of Large Construction Structures*

Udział habilitanta w przygotowaniu publikacji: **80%**

Gontarz Sz., Mączak J., Szulim P.: *Online monitoring of steel construction using passive methods*.

Udział habilitanta w przygotowaniu publikacji: **60%**

P07 – Szulim P., **Gontarz Sz.**, Mączak J.: *Calibration of magnetic field sensors used for diagnosis of steel construction*, Journal of Electrical Engineering, VOL 66. NO 7/s, 2015, 203-207

IF(5-letni): 0.498, IF (2015): **0,407**, Punkty MNiSW (2015): **15 pkt.** (lista A, Web of Science, JCR)

Udział habilitanta w przygotowaniu publikacji: **70%**

P08 - Książka pod redakcją: Tadeusza Dąbrowskiego i Stanisława Radkowskiego: *Wybrane zagadnienia diagnozowania i użytkowania urządzeń i systemów*. Wydawnictwo: Wojskowa Akademia Techniczna, ISBN 978-83-7938-074-9.

Szymon Gontarz, autor rozdziału: *Magnetyczne metody pasywne na tle dotychczasowych magnetycznych metod aktywnych w diagnostyce*, zakres stron: 215÷250, rok wydania: 2015. (na bezpośrednio skierowaną do mnie prośbę z biblioteki **German National Library of Science and Technology** książka została przekazana do tamtejszych zbiorów).

Udział habilitanta w przygotowaniu publikacji: **100%**

P09 - Szulim P., **Gontarz Sz.**: *Using the surrounding magnetic field in the diagnosis of BLDC motors*, Journal of Electrical Engineering, VOL 66. NO 7/s, 2015, 193-198

IF(5-letni): 0.407, IF (2015): **0,498**, Punkty MNiSW (2015): **15 pkt.** (lista A, Web of Science, JCR)

Udział habilitanta w przygotowaniu publikacji: **30%**

P10 - Gontarz Sz., Szulim P.: *Evaluation of the impact of environmental hazards associated with mechanical faults in BLDC electric motors.* Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ). Mar2016, Vol. 15 Issue 3, p491-504. 14p.

IF(5-letni): 0.795, IF (2015): **1.008**, Punkty MNiSW (2015): **15 pkt.** (lista A, Web of Science, JCR)

Udział habilitanta w przygotowaniu publikacji: **60%**

P11 - Szymon Gontarz, Przemysław Szulim, Jarosław Seńko, Jacek Dybała, Stanisław Radkowski: *Sposób automatycznego wykrywania zdarzeń drogowych, zgłoszenie patentowe P-411766*, data zgłoszenia: 26.03.2015 r.

Udział habilitanta w przygotowaniu patentu: **65%**

P12 - Gontarz Sz., Radkowski S., Szulim P., Jackiewicz D., Salach J., i inni. System doradczoko-eksperski wraz z autorską bazą danych do diagnozowania pasywnymi metodami magnetycznymi obiektów z branży energetycznej. System, w ramach projektu PBS1/B4/6/2012 pt.: *„Wykrywanie wczesnych faz uszkodzeń stalowych elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy zjawisk magnetomechanicznych w ziemskim polu magnetycznym.”*, jest włączony do oferty firmy EC Systems Sp. z o.o., 2014/2015 r.

Udział habilitanta w przygotowaniu systemu: **15%**

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich potencjału do wykorzystania.

4.3.1. Wprowadzenie.

W swojej praktyce naukowej zajmuję się analizą wibroakustyczną, przetwarzaniem i analizą sygnałów oraz nieinwazyjnymi metodami diagnostyki technicznej dla osiągnięcia celów bezpieczeństwa systemów technicznych. Natomiast głównym kierunkiem moich badań i prac rozwojowych jest rozwijanie pasywnych metod magnetycznych poprzez oryginalne podejście do zgłębiania fizycznych ich podstaw oraz wykorzystanie i ukierunkowanie potencjału rozwijanych metod na zastosowanie w konkretnych gałęziach przemysłu. Tego nurtu dotyczy wskazane przeze mnie główne osiągnięcie naukowe.

Dotychczas nowoczesnym podejściem technicznym było stosowanie zaawansowanych systemów wspomagania, projektowania i optymalizacji konstrukcji. Szeroko rozwinięte modelowanie komputerowe uwzględniało założone obciążenia obiektu, względy ekonomiczne jak i ekologiczne, nastawione na minimalizację czynników mogących szkodzić środowisku w czasie wytwarzania danego obiektu technicznego. Takie podejście nie zapewnia wystarczającego bezpieczeństwa, czego dowodem są wciąż zdarzające się nieprzewidziane awarie i katastrofy takie jak: zawalenie się dachu hali na terenie Międzynarodowych Targów Katowickich 28 stycznia 2006r.,

podczas trwania wystawy gołębi pocztowych, kiedy zginęło 65 osób, a ponad 170 zostało rannych. Bezpośrednią przyczyną tragedii był nadmiar śniegu zalegającego na dachu hali. Do katastrofy przyczynił się zły stan techniczny konstrukcji spowodowany wcześniejszymi jej przeciążeniami. Była to największa tego typu katastrofa we współczesnych dziejach Polski, która wymusiła na ustawodawcy nowelizację prawa budowlanego, które obecnie przewiduje, że budynki o powierzchni zabudowy przekraczającej 2 tys. m² oraz inne obiekty o powierzchni dachu większej niż 1 tys. m² mają być kontrolowane dwukrotnie w ciągu roku — przed okresem zimowym i po jego zakończeniu. Przytoczona katastrofa była znamieną z uwagi na to, że podczas katastrofy w budynku odbywała się wystawa gołębi, które posiadają i wciąż posługują się zmysłem magnetycznym. Z relacji wielu świadków wynikało, że ptaki tuż przed katastrofą zachowywały się niespokojnie, a z naukowego punktu widzenia mogło to być powiązane z pewną ilościową lub jakościową zmianą pola magnetycznego w obrębie konstrukcji hali. Te wydarzenia stanowią zarówno motywację do podjęcia diagnozowania niskoenergetycznych faz powstawania uszkodzenia jak i pokazują możliwy kierunek rozwoju pasywnych metod magnetycznych w ujęciu naukowym (bez konieczności używania problematycznych i subiektywnych biosensorów).

Biorąc pod uwagę powyższe spostrzeżenia nie dziwi fakt szerokiego zainteresowania metodami umożliwiającymi przeprowadzenie diagnozy i prognozy stanu maszyn w sposób bezinwazyjny (NDT – Non Destructive Techniques). Techniki magnetyczne są uznawane wraz z metodami ultradźwiękowymi, radiograficznymi, prądów wirowych i penetracyjnymi do pięciu najważniejszych metod kategorii NDT. Najpopularniejsze metody magnetyczne to procedura defektoskopii magnetycznej (np. metoda magnetyczno-proszkowa) oraz metoda rozproszonego pola magnetycznego (MPR). Umożliwiają one wykrywanie wad powierzchniowych i podpowierzchniowych ferromagnetycznych obiektów metalowych o różnych kształtach, różnej wielkości, w materiałach o gładkiej lub surowej powierzchni. Natomiast metoda prądów wirowych należy do tej samej grupy technik elektromagnetycznych, lecz bazuje nie na działaniu linii sił, a na zjawiskach indukcyjnych. Obydwa podejścia umożliwiają wykrywanie najbardziej niebezpiecznych wad: powierzchniowych wad płaskich, wąskoszczelinowych. Pomimo tego, że spełniają one bardzo ważną rolę w diagnostyce technicznej, to przystosowane są do wykrywania już istniejących defektów. Do metod, które są w stanie wykrywać wczesne fazy rozwoju uszkodzenia pretendują metody: emisji magnetoakustycznej (EMA) oraz metoda pamięci magnetycznej metalu (MPM). Z punktu widzenia prowadzenia moich prac naukowo-badawczych interesująca jest metoda MPM, która jest techniką pasywną. Badacze promujący MPM deklarują umiejętność metody wykrywania nie tylko pęknięć, ale również lokalizacji wczesnej fazy zmęczenia materiału i defektów struktury, odwzorowanej przez strefy koncentracji naprężeń (SKN) i lokalną anizotropię materiału. Metoda MPM wykorzystuje zjawisko zapamiętywania skutków cyklicznych i granicznych obciążeń struktury materiału i polega na obserwacji stanu technicznego obiektu z wykorzystaniem „własnego magnetycznego pola rozproszenia” (WMPR). Założony model zjawisk zachodzących w obiekcie, które mają wpływ na sygnał magnetyczny pochodzący z obiektu, jest uproszczony i przyjmuje za dominujące namagnesowanie resztkowe jako wspólne źródło informacji do rozpoznawania pęknięcia, pęcherzy podpowierzchniowych, wtrąceń, wżerów korozyjnych, jak również zmian przenikalności magnetycznej związanej z koncentracją naprężeń. Natomiast rezultaty moich prac wskazują na możliwość celowego rozwinięcia fizykalnego opisu, rejestracji (w podejściu pasywnego

obserwatora stanu) oraz interpretacji pola magnetycznego w celu dotarcia do nowych informacji na temat stanu wyężenia materiału przed wystąpieniem uszkodzenia oraz o funkcjonowaniu obiektu technicznego.

Zastosowanie techniki pasywnej ma dużo zalet w porównaniu z powszechnie znanymi i używanymi metodami magnetycznymi aktywnymi. Metody pasywne nie wymagają stosowania sztucznych źródeł pola magnetycznego, co stwarza możliwość stosowania tej techniki nie tylko dla diagnostyki doraźnej, ale również do ciągłego monitoringu, jak i aplikacji, tam gdzie nie jest dozwolone, np. ze względów bezpieczeństwa, używanie sztucznych źródeł pola magnetycznego. Niewątpliwą zaletą tych metod jest to, że badany obiekt nie musi być w żaden specjalny sposób przygotowany do badań, a sam pomiar może być wykonywany w trudno dostępnych miejscach, w różnych środowiskach i również na odległość. Dodatkowo stosowane przyrządy pomiarowe mają małe gabaryty, mogą mieć automatyczne zasilanie i być relatywnie tanie. Jednakże największa zaleta to możliwość wykrywa niskoenergetycznych faz powstawania uszkodzenia.

Tematyka prowadzonych przeze mnie badań w zakresie pasywnych metod magnetycznych skupia się na wykorzystaniu pasywnego obserwatora stanu oraz opisie, analizie i wykorzystaniu zjawisk magnetomechanicznych, jakie występują zarówno w maszynach (w tym również w pojazdach) jak i konstrukcjach architektonicznych. Moje osiągnięcia w tym zakresie pokazują różnorodność aplikacyjną i dostępność informacji w obrębie grupy pasywnych metod magnetycznych. Dotyczą one określania stanu wyężenia materiału na podstawie niskoenergetycznych zmian pola magnetycznego i obejmują identyfikację stanu sprężystego i plastycznego odkształceń (również z odległości), obserwacji efektów zmęczeniowych oraz monitorowania pracy napędów elektrycznych. Wymienione zadania są realizowane specyficznym w zależności od wykorzystywanych zjawisk fizycznych, własności i charakteru analizowanego obiektu oraz przy użyciu różnych technik pomiarowych i analiz.

Po usystematyzowaniu i uszczegółowieniu zagadnień poruszanych przeze mnie w ramach opisywanego osiągnięcia, można stwierdzić, że mój dorobek naukowy w tym zakresie składa się z dwóch obszarów. Pierwszy dotyczy badań nad materiałami magnetycznymi miękkimi, ze szczególnym uwzględnieniem stali konstrukcyjnych. Są to głównie prace: **(P01, P04, P08, P09)**. Zawierają one całą przyjętą przeze mnie metodologię, która poprzez analogie dąży do wykorzystania efektów krzyżowych w celu dotarcia do nowych informacji diagnostycznych. Jest to możliwe dzięki właściwemu wykorzystaniu efektów magnetomechanicznych, które są skutkiem specyficznego i mało do tej pory poznanego magnesowania naprężeniowego. Prace w tym obszarze prowadzą do zdefiniowania histerezy magnetomechanicznej, która otwiera całą gamę możliwości magnetycznego pasywnego podejścia do różnych rodzajowo obiektów technicznych. Prace z tego zakresu przedstawione zostały w rozdziale 4.3.2. Drugi obszar przechodzi od zdobytej wiedzy podstawowej do obiektów technicznych, którymi są: stalowe konstrukcje oraz pojazdy. Są to prace **(P02, P03, P05, P06, P07, P10, P11)**, które zostały przedstawione w rozdziale 4.3.3.

Konkretnym efektem moich prac badawczych było poznanie, opis i ocena wybranych sposobów oddziaływania między zastanym polem magnetycznym otoczenia, a materiałem eksploatowanego obiektu technicznego (co stoi u podstaw grupy metod magnetycznych pasywnych w diagnostyce technicznej). Uzyskane wyniki prac uzupełniają wiedzę teoretyczną o relacjach istniejących pomiędzy wymuszeniami i ich skutkami, a właściwościami magnetycznymi materiału

obserwowanymi w polu magnetycznym. Stwarza to możliwość szerszego zastosowania nowych metod detekcji subtelnych zmian struktury domenowej w materiałach polikrystalicznych, a co za tym idzie przekształcenie klasycznego materiału konstrukcyjnego (współczesnych stali) w materiał „inteligentny”, który udostępni diagnoście nowe informacje o:

- poziomie bieżącego wyężenia materiału polikrystalicznego,
- wczesnych symptomach powstającego uszkodzenia np. narastającego zmęczenia materiału poprzedzającego otwarte pęknięcie.

Współcześnie wykorzystywane w przemyśle metody NDT nie odwzorowują współczesnych możliwości metrologicznych i analitycznych. Poprzez wykorzystanie słabych efektów istniejących w materiałach konstrukcyjnych można przekształcić każdy materiał konstrukcyjny we wspomniany materiał „inteligentny”.

Moje doświadczenie w wibroakustycznych technikach diagnostycznych oraz innych współcześnie używanych (metody: tensometryczne, światłowodowe, bazujące na propagacji fal, i inne), pozwala na weryfikację opracowywanych magnetycznych metod diagnostycznych oraz na ich sprawny rozwój. Prace które wykonuję, zmierzają do uniezależnienia pasywnych metod magnetycznych, od innych wspomagających, do stopnia kiedy będą one mogły stanowić komplementarne i wiarygodne źródło informacji o stanie obiektów technicznym, takich jak maszyny czy konstrukcje architektoniczne.

4.3.2. Omówienie osiągniętych wyników w zakresie badań nad efektami magnetomechanicznymi dla materiałów magnetycznie miękkich.

W celu pozyskania nowej informacji diagnostycznej na temat funkcjonowania obiektów technicznych proponuję analizę efektów krzyżowych (między mechaniką a magnetyzmem) - artykuł (P09). Wykazane prace dowodzą, że po zmianie stanu naprężenia w materiałach o własnościach magnetycznych, następuje przekształcenie materiału do stanu magnetycznego - przejawiać się to może w odpowiednim magnesowaniu materiału. Owo namagnesowanie jest skutkiem zjawisk magnetomechanicznych, które mogą być efektem statycznych i dynamicznych obciążeń materiału, a które mogą być odpowiednio rejestrowane i analizowane (P01,P04). W momencie przekroczenia naprężeń dopuszczalnych lub pojawienia się odkształceń plastycznych w materiale, istnieje możliwość rejestracji i opisu właściwości magnetycznych, które wpływają w sposób jakościowy i ilościowy na obserwowane własne pole magnetyczne obiektu (P01). Dodatkowe zastosowanie autorskiej metody separacji efektów magnetycznych odwracalnych i nieodwracalnych pozwala na identyfikację niskoenergetycznych zmian zachodzących w strukturze materiału (P08). W przypadku długoczasowych cyklicznych obciążeń materiału, istnieje możliwość identyfikacji procesów zmęczeniowych, przy użyciu odpowiednich płaszczyzn reprezentacji zmian pola magnetycznego. Otrzymywane wyniki badań i analiz oraz włączenie do procesu badawczego właściwych dla obiektów wirujących narzędzi, były podstawą do analizy magnetycznej tej klasy obiektów (P10). Odniesienie się do analizy efektów krzyżowych (między mechaniką a magnetyzmem) jako

alternatywę do bezpośrednich zjawisk elektrycznych w przypadku silników BLDC (**P09**), pozwoliło pozyskać informacje o funkcjonowaniu silnika biorąc pod uwagę niewyrównowazenie oraz ekscentryczność statyczną i dynamiczną wirnika.

4.3.2.1. Metodyka badań

W najnowszych pracach z zakresu diagnostyki technicznej podejmuje się w coraz szerszym stopniu zagadnienie jak najwcześniejszego wykrywania uszkodzeń w okresie nukleacji, umożliwiające antycypowanie zdarzeń i podejmowanie działań wg zasady "przewiduj i zapobiegaj". Jest to charakterystyczna cecha nowoczesnej strategii proaktywnej eksploatacji, dzięki której coraz częściej możliwe są prognozy i stworzenie modelu decyzyjnego dla działań obsługowo-naprawczych oraz weryfikacja stanu technicznego obiektów pozwalająca na bezpieczną ich eksploatację i kontakt z człowiekiem. W swoich pracach zwracam szczególną uwagę na ten kierunek rozwoju diagnostyki (**P04, P05, P06, P08**) oraz stwierdzam jak i dowodzę, że tak sformułowane zadanie wymaga poszukiwania i określenia zupełnie nowych, odmiennych sygnałów i ich cech oraz budowy odpowiednich modeli diagnostycznych odwołujących się do zjawisk fizykalnych. Aktualnie wzrósł teoretyczno-eksperymentalny zasób środków badawczych - od sieci sensorycznych do wyspecjalizowanych wielowymiarowych transformat. Pojawiają się coraz częściej śmiałe podejścia w diagnostyce konstrukcji inżynierskich, czego przykładem może być choćby zwana z angielska Structural Health Monitoring. Dlatego też, jak pokazują to moje prace, można obecnie pokusić się o formułowanie zagadnień międzydziedzinowych (niezbędnych w rozwijanym przeze mnie obszarze naukowym), a przy ich rozwiązywaniu korzystać z teorii podobieństwa, analogii i nawet metafory. Takie podejście prezentują moje badania oraz prace rozwojowe, które służą zmniejszeniu ryzyka i podwyższeniu bezpieczeństwa obiektów i systemów naszej technosfery. O słuszności przyjętych moich założeń metodycznych jak i obranych celów zarówno naukowych jak i utylitarnych świadczą otrzymane projekty badawczo-rozwojowe wyłonione na drodze odpowiednich konkursów (PBS1/B4/6/2012: projekt pt.: „Wykrywanie wczesnych faz uszkodzeń stalowych elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy zjawisk magnetomechanicznych w ziemskim polu magnetycznym.” - Projekt zajął pierwsze miejsce na liście rankingowej PBS1 NCBiR projektów przeznaczonych do finansowania, trwał 3 lata, a w chwili obecnej jest już rozliczony oraz DOB-BIO6/21/8/2014: projekt realizowany na rzecz Bezpieczeństwa i Obronności Państwa pt.: "Pasywne i aktywne metody magnetyczne jako podstawa nowej metodyki badań związanych z wykrywaniem, zwalczaniem i neutralizacją zagrożeń terrorystycznych oraz przestępczości zorganizowanej", który otrzymał finansowanie, zajmując drugie miejsce na liście rankingowej - projekt w trakcie realizacji), współpraca z firmami zewnętrznymi oraz otrzymana przeze mnie główna nagroda w konkursie Innowator Mazowsza.

Przyjęta i rozwijana przeze mnie metodyka badawczo-aplikacyjna przy pomocy zaobserwowanych analogii wykorzystuje efekty krzyżowe, co pozwala na osiągnięcie moich zdefiniowanych założeń. Duży potencjał w dążeniu do wytyczonych celów ulokowałem w wykorzystaniu efektów krzyżowych, które tworzą się pomiędzy wielkościami kanonicznymi i sprzężonymi odpowiednimi dla różnych postaci energii (mechaniczna, elektryczna, magnetyczna – Tabel 1).

Tabela.1. Kanoniczne i sprzężone wielkości fizyczne ośrodków ciągłych.

forma energii	wielkość kanoniczna	wielkość sprzężona
mechaniczna potencjalna	odkształcenie	siła
elektryczna	indukcja elektryczna	natężenie pola elektrycznego
magnetyczna	indukcja magnetyczna	natężenie pola magnetycznego

Szczególną uwagę poświęciłem zgłębieniu wiedzy na temat efektów krzyżowych pomiędzy dziedzinami magnetyzmu i mechaniki oraz ich wykorzystaniu. Stwarzają bowiem one szansę, nie tylko dalszego rozwoju istniejących metod diagnostyki często użytecznych tylko dla wąskiego wachlarza obiektów, ale pozwalają również na dotarcie do nowych zjawisk i zależności niosących informacje diagnostyczne użyteczne dla szerszej grupy obiektów technicznych – rozdz.4.3.3. Dlatego też rozwijam podejście wspólnoty modelowej i metodycznej w diagnostyce rodzajowo różnych obiektów (materiały, maszyny, budowle, pojazdy), używając różnych zjawisk jako nośników informacji diagnostycznej. Tego typu zagadnienie wymaga nie tylko dziedzinowej wiedzy szczegółowej, ale i zdolności do syntezy międzydziedzinowej, abstrakcji i formułowania analogii i myślenia metaforycznego. Prowadzone badania stanowią więc istotny wkład w rozwój multidyscyplinarnej dziedziny naukowej jaką jest szeroko rozumiana diagnostyka obiektów technicznych.

Zgodnie z opisaną metodyką w artykule **(P09)**: „Using the surrounding magnetic field in the diagnosis of BLDC motors” przedstawiono matematyczne podstawy diagnostyki silnika elektrycznego synchronicznego, bezszczotkowego, w oparciu o analizę sygnału pola magnetycznego rejestrowanego w bliskiej odległości od silnika. Wynikiem prac modelowych jest analityczna postać rozkładu pola w przestrzeni poprzecznej silnika, uwzględniająca błędy demagnetyzacji oraz niewspółosiowość statyczną i dynamiczną. Model dostarcza informacji o rozkładzie pola w każdej podprzestrzeni silnika, ale szczególnie użytecznym okazała się być postać równania opisującego rozkład pola w otoczeniu silnika. Analiza tego równania ujawnia wpływ modelowanych błędów na komponenty częstotliwościowe obserwowane w widmie sygnału pola magnetycznego. Z równania można sformułować wiele ciekawych wniosków dotyczących efektów modulacyjnych związanych z uszkodzeniami. Wyniki z symulacji numerycznej zostały porównane z wynikami otrzymanymi z badań stanowiskowych. Wykazały dużą zgodność z danymi zarejestrowanymi dla rzeczywistego obiektu. Najciekawszym zaobserwowanym efektem w tym nowatorskim podejściu jest fakt, że obserwacja pola magnetycznego w przypadku tego typu silnika wykazuje znacznie niższy poziom skomplikowania widma częstotliwościowego w porównaniu do widma sygnału prądu. Dodatkowo, co bardzo istotne i co wykazano w artykule, sygnał pola jest znacznie mniej podatny na zmiany warunków pracy silnika (prędkość obrotowa i obciążenie) w porównaniu z sygnałem drganiowym czy sygnałem prądowym.

Drugim wspomnianym narzędziem w promowanej przeze mnie metodyce prowadzenia badań jest posługiwanie się analogiami. Dzięki temu, dodatkowo istnieje szansa opracowania nowej, innowacyjnej metodyki do analizy dowolnego obiektu technicznego i zjawisk fizycznych ściśle z nim związanych. Efektem takiego podejścia jest zwykle przeprowadzenie zoptymalizowanego (na podstawie wyników w analogicznych odpowiednikach) eksperymentu diagnostycznego i przez to

dotarcie do informacji o stanie technicznym obiektu, która do tej pory pozostawała niedostępna dla współczesnej diagnostyki. Na potrzeby realizacji celów mojej pracy, zgodnie z przyjętą metodyką, rozpoznano bardzo szczegółowo stan wiedzy dotyczącej metod magnetycznych w ujęciu jak najbardziej komplementarnym. Na tle istniejących aktywnych magnetycznych metod diagnostycznych, zostały przedstawione obecnie intensywnie rozwijane metody magnetyczne pasywne (P08). Usystematyzowano zebrane informacje, czego efektem jest przeprowadzona autorska taksonometria metod magnetycznych w diagnostyce obiektów technicznych, w której wyodrębniono dwie główne grupy ze względu na związek badanych wielkości z procesem namagnesowania oraz sposób ich obserwacji – Tabela 2.

Tabela. 2. Podział metod magnetycznych w diagnostyce.

Metody magnetyczne oparte na działaniu linii sił	Metody indukcyjne		
	własności pętli histerezy	efekty dotyczące procesu histerezy magnetycznej	wielkości pośrednio związane ze stanem namagnesowania
-metoda magnetyczno-proszkowa -metoda magnetograficzna - metody magnetoptyczne	-pomiar parametrów pętli histerezy -pomiar składowych harmonicznych -pomiar anizotropii namagnesowania	-pomiar polowego efektu Barkhausena -pomiar emisji magnetoakustycznej	-pomiar zmiany prędkości fal ultradźwiękowych -pomiar natężenia magnetycznego pola rozproszonego -pomiar natężenia prądów wirowych -metoda Ground-penetrating radars

Bazując na dokonanym zestawieniu i przy użyciu dostrzeżonych analogii, zostały omówione podstawy fizyczne działania metod magnetycznych pasywnych ze wskazaniem ich charakterystycznych potencjalnych możliwości dostarczania informacji o obiekcie. Takie podejście pozwoliło na wykorzystanie efektów krzyżowych w analizie zarówno materiałów, stalowych konstrukcji (P02, P06, P07), jak również maszyn elektrycznych (P09), napędów (P08) oraz pojazdów (P03, P05, P11). Tak szeroko rozpoznany potencjał w pasywnym podejściu do metod magnetycznych, a który z powodu rozwoju technologicznego stał się w XXI wieku możliwy do realizacji, jest podstawą do prowadzenia prac we wskazanych przeze mnie obszarach. Interesującym jest fakt przenikania pewnych zachowań odpowiednich dla zjawisk fizycznych właściwych dla tych obszarów, lecz dostępnych przy użyciu innego podejścia badawczego. Analizując rezultaty mojego podejścia, widać wyraźnie, że tworzy się nowy ogólny podział metod magnetycznych na techniki aktywne (wykorzystujące oddziaływanie na badane objekty zewnętrznym, sztucznie wygenerowanym polem magnetycznym o różnych parametrach w zależności od stosowanej techniki) oraz pasywne (wykorzystujące jedynie istnienie naturalnego pola magnetycznego Ziemi lub pole magnetyczne właściwe dla natury funkcjonowania obiektu), które są obszarem moich osiągnięć. Podział metod aktywnych jest ugruntowany naukowo oraz aplikacyjnie, natomiast metod pasywnych, z racji niewielu przedstawicieli (EMA, MPM) i trudności z analizą zjawisk fizycznych, prawie nie istnieje. Opierając się na efektach moich prac badawczo-rozwojowych oraz korzystając ze

stosowanego przez mnie podejścia wykorzystującego narzędzie metafory oraz analogii, można pokusić się o stworzenie zarysu podziału metod pasywnych bazując choćby na podziale przedstawionym w tabeli 2. Metodom opartym na działaniu linii sił może odpowiadać nowa grupa metod bazująca na remanencji magnetycznej wynikającej z historii pracy mechanicznej obiektu – są to techniki wykorzystujące nieodwracalne efekty magnetomechaniczne (o której będzie mowa w dalszej części opisu). Natomiast drugą grupę, metod indukcyjnych, można przedstawić w ujęciu pasywnym jako kategorię technik wykorzystujących chwilowe zmiany własnego pola magnetycznego obiektu (znajdującego się w obszarze oddziaływań pola magnetycznego Ziemi) indukowane zmiennymi warunkami pracy lub obciążeniem – jest to podejście biorące pod uwagę przede wszystkim magnetomechaniczne efekty odwracalne (o których będzie mowa w dalszej części opisu).

W świetle moich osiągnięć z prowadzonych badań i prac rozwojowych wynika, że współczesna wiedza z zakresu nieinwazyjnych metod diagnostycznych (ang. NDT – Non Destructive Testing) nie polega już wyłącznie na „intuicji i wiedzy eksperta dotyczącej wąskiej dyscypliny naukowej/technicznej”, ale jest czymś więcej, jest teraz rozbudowana o złożone multidyscyplinarne sposoby modelowania obiektów wraz z jego uszkodzeniami, przetwarzaniem oraz wnioskowaniem diagnostycznym.

4.3.2.2. Magnesowanie naprężeniowe.

Z powyższych rozważań wynika jednoznacznie, że tak samo jak w przypadku metod aktywnych, także w tej metodzie analizowane są pewne stany namagnesowania obiektu, lecz źródła tego namagnesowania są różne. Podstawą działania pasywnych metod magnetycznych jest istnienie ziemskiego pola magnetycznego. Można przyjąć, że Ziemia jest jednorodnie namagnesowaną kulą, mającą swoje osie magnetyczne oraz bieguny. W tej sytuacji każda „substancja fizyczna” będąca w obszarze magnetosfery (bez względu czy będzie ona znajdować się w wodzie, na lądzie czy w powietrzu) będzie miała wpływ na lokalne pole magnetyczne, wchodząc w interakcję z polem magnetycznym Ziemi. Wpływ ten będzie różny w zależności od „ilości i jakości” materiału, z którego jest wykonany konkretny obiekt (**P01**). Zakładając tak opisaną ogólnie sytuację, okazuje się, że niektóre ciała mają zdolność wytwarzania wokół siebie pola magnetycznego. Inne natomiast, umieszczone w zewnętrznym polu magnetycznym wywołują mniej lub bardziej wyraźną jego zmianę. Oba zachowania mają swoją przyczynę w prądach mikroskopowych, tworzonych przez ruch elektronów naładowanych jąder atomowych. Natomiast na zewnątrz, taki atom lub cząsteczka, zachowuje się jak dipol magnetyczny. Dla celów modelowania, właściwości magnetyczne ferromagnetyka można opisać traktując go jako zbiór dipoli magnetycznych m_i związanych z mikroprądami. Zgodnie z tą koncepcją, własności magnetyczne ciała jako zbioru dipoli będzie charakteryzować wektor magnetyzacji M definiowany jako wypadkowy moment magnetyczny w jednostce objętości:

$$M = \frac{\sum m_i}{\Delta V} \quad (1)$$

$$m = f(\rho_a, \mu, K_1, K_2, T, \sigma, \sigma_{II}, \sigma_{III}, H) \quad (2)$$

gdzie: μ i μ_0 - przenikalność magnetyczna badanej substancji i próżni (w układzie jednostek SI $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m); V – objętość substancji; m – magnetyzacja elementarnych molekuł substancji; ρ_a i μ_a – gęstość atomowa i moment magnetyczny atomu, które wynikają ze składu chemicznego i typu komórki elementarnej sieci krystalograficznej; K_I i K_2 – stałe anizotropii strukturalnej kryształu (komórki elementarnej); T – temperatura materiału; σ_I , σ_{II} i σ_{III} – naprężenia własne i eksploatacyjne: dalekiego zasięgu (typ I) rozciągające się w skali makroskopowej, średniego zasięgu (typ II) rozciągające się w skali kilku ziaren i bliskiego zasięgu (typ III), które dotyczą rozmiarów pojedynczych atomów i są zrównoważone wewnątrz ziarna; H - natężenie zewnętrznego pola magnetycznego.

Żeby zdefiniowana zależność mogła być przejrzysta i opisana w sposób bardziej użyteczny diagnostycznie, stosując przejście do skali makroskopowej, gdzie mogą zapisać:

$$m = f(\lambda, \omega, E, \nu, H, T) \quad (3)$$

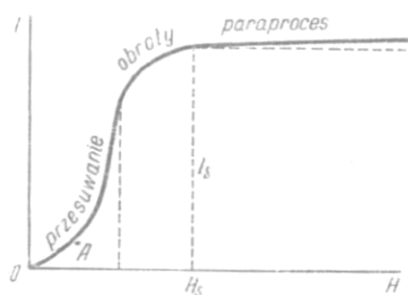
λ i ω - składowe magnetostrykcji (zmian liniowych $\lambda = \Delta l/l$ i zmian objętościowych $\omega = \Delta V/V$); E i ν - moduł Younga i współczynnik Poissona.

Jeśli nastąpi trwale uporządkowanie momentów magnetycznych, materiał charakteryzuje się zewnętrznymi właściwościami magnetycznymi (biegunami). Takie zachowanie jest charakterystyczne dla magnetyków uporządkowanych, do których zaliczamy ferromagnetyki. Do ferromagnetyków należą m.in. żelazo, kobalt, nikiel i niektóre stopy oraz metale przejściowe z grupy żelaza i metali ziem rzadkich. Rozpatrując możliwość diagnozowania obiektów technicznych, których podstawowym budulcem są stale lub staliwa, możemy założyć, że w głównej mierze będziemy mieli do czynienia z materiałami ferromagnetycznie miękkimi. Tracą one zewnętrzne namagnesowanie po usunięciu pola magnetycznego zachowując jedynie namagnesowanie reszkowe znacznie mniejsze od maksymalnego.

Dla tego typu materiałów wypadkowa wartość M zmienia się znacząco pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego lub przy jego udziale, pod wpływem innych oddziaływań fizycznych na obiekt (**P01**). Właściwości elektryczne i magnetyczne materiałów są dobrze rozpoznane od ponad 150 lat, lecz tylko dla wąskiej ich grupy, np. stali krzemowych stosowanych w elektrotechnice czy stali martenzytycznych stosowanych na magnesy trwałe. Dla typowych gatunków stali konstrukcyjnych i narzędziowych (niestopowych, węglowych, stopowych o strukturze ferrytycznej, ferrytyczno-perlitycznej czy austenitycznej) właściwości magnetyczne i elektryczne nie są wyznaczone (unormowane), co utrudnia zastosowanie metod magnetycznych w diagnozowaniu takich materiałów. Mając ten niedostatek na względzie oraz bazując na przyjętym makroskopowym modelu, w pracy (**P01** i **P08**) opisano szereg eksperymentów - pomiarów zakłóceń pola magnetycznego Ziemi, mających na celu rejestrację zjawisk magnetomechanicznych i ich właściwości dla typowych stali konstrukcyjnych. Przeprowadziłem szereg eksperymentów, symulujących zaburzenia pola magnetycznego wywołane zmianą naprężeń w materiale: doświadczenie w zakresie odkształceń sprężystych, doświadczenie w zakresie odkształceń plastycznych; zbadałem i przeanalizowałem: rozkład pola magnetycznego w przestrzeni, składowe wektora natężenia pola magnetycznego, wpływ rodzaju materiału na efekty magnetosprężyste, wpływ obciążeń na właściwości magnetyczne próbek o różnym kształcie, zjawiska magnetomechaniczne podczas obciążeń zmęczeniowych. Przy prowadzeniu badań/eksperymentów dotyczących magniesowania naprężeniowego, kluczowe było zbudowanie paramagnetycznego

stanowiska wytrzymałościowego. Dowiodłem, że właściwości magnetyczne typowych stalowych materiałów konstrukcyjnych, umożliwiają estymowanie stanu naprężeń mechanicznych, bazując jedynie na oddziaływaniu słabego ziemskiego pola magnetycznego. Kontrolując w eksperymencie elastyczny i plastyczny stan naprężeń w stalowych próbkach, została potwierdzona jakościowa i ilościowa zmiana pola magnetycznego, która jest w ścisłej zależności z jej odkształceniem i stanem wyężenia. Szczególnie cenna wydaje się informacja o jakościowej zmianie właściwości magnetycznych (związanej z osiągnięciem stanu odkształceń plastycznych), która wskazuje na możliwość uzyskania informacji diagnostycznej o poziomie wyężenia materiału uniezależniając się od ilościowych zmian ściśle związanych z jego rodzajem.

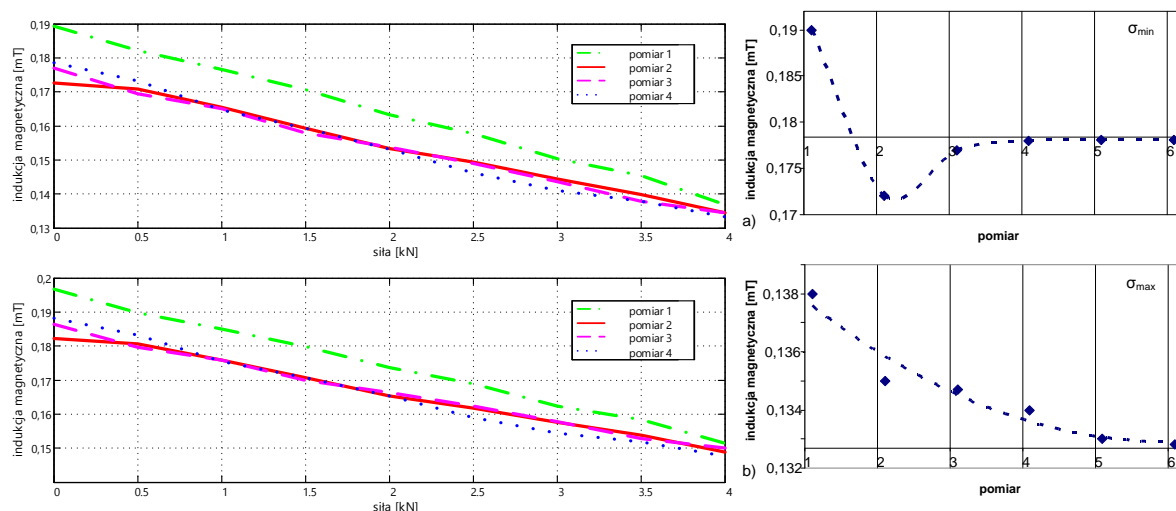
Własności ferromagnetyczne związane są z momentami magnetycznymi domen (obszarów sieci krystalicznej o określonym momencie magnetycznym). Opisane zachowania ferromagnetyka można wyjaśnić na gruncie teorii domen P. Weiss'a, według której każdy materiał ferromagnetyczny w skali mikroskopowej składa się z domen magnetycznych, w których atomy tworzą przestrzenne siatki krystaliczne wykazując momenty magnetyczne (niezerowy wektor magnetyzacji). W praktyce magnesowania technicznego, zjawiska związane ze zmianą stanu magnetyzacji M mają bardzo złożony charakter, można je jednak przybliżyć krzywą tak jak na rysunku 1.



Rysunek 1. Modelowy proces zmiany stanu magnetyzacji ferromagnetyka.

Porządkowanie struktury domenowej następuje poprzez rozrastanie się domen (przesuwanie ścian międziodomenowych - zachodzi tutaj przerzucanie momentów poszczególnych obszarów w kierunku łatwego magnesowania, bliższe do kierunku zewnętrznego pola) i obroty domen (momenty poszczególnych obszarów namagnesowania spontanicznego starają się ustawić równoległe do pola zewnętrznego) oraz tzw. paraproces (wielkość nasycenia technicznego wzrasta w skutek orientacji momentów spinowych poszczególnych elektronów, znajdujących się wewnątrz obszarów namagnesowania spontanicznego).

Opisany proces odnosi się do przypadku wyidealizowanego i jest klasycznym opisem właściwym w przypadku odpowiedzi materiału na wymuszenie w postaci zmiany natężenia pola magnetycznego. W rzeczywistości sytuacja jest znacznie bardziej skomplikowana bowiem procesy przesuwania granic, obrotów i paraproces nakładają się na siebie i charakter ich jest silnie uzależniony od własności strukturalnych ferromagnetyka. Dodatkowo przy udziale innych oddziaływań fizycznych (równanie 2) na obiekt znajdujący się nawet w słabym polu magnetycznym nie można wykluczyć zmiany jego namagnesowania z udziałem procesu obrotu domen – co widać w postaci nieodwracalnych i nieliniowych efektów pokazanych na rysunku 2.



Rysunek 2. Zmiana stanu magnetyzacji w czterech kolejnych cyklach obciążenia.

Bez względu z jakiej bezpośredniej przyczyny materiał zmienił swój stan magnetyzacji, proces tej zmiany może się odbyć jedynie przez mechanizm przesuwania ścian domenowych lub obrotu domen, a w przypadku metod pasywnych, bez udziału dodatkowych silnych źródeł pola magnetycznego, można wykluczyć paraproces. W przypadku rozwijanej przeze mnie dziedziny podejścia pasywnego do oddziaływań magnetomechanicznych zakłada się, że oddziałujące pole magnetyczne jest na poziomie pola magnetycznego Ziemi oraz jest ono w przybliżeniu stałe, dlatego nie będzie ono głównym czynnikiem zmiany magnetyzacji obiektu, lecz czynnikiem towarzyszącym, a przede wszystkim niezbędnym. W tym niezbędnym otoczeniu pola magnetycznego wewnętrzne zmiany w strukturze materiału będą inicjować opisane procesy powodujące zmiany stanu magnetycznego materiału.

Z równania (3), przedstawionego modelu magnesowania oraz przeprowadzonych eksperymentów wynika, że zmiana:

- struktury materiału (poziomu degradacji),
- rozkładu naprężeń,
- temperatury materiału,
- natężenia pola magnetycznego

będzie wpływała na przestrzenny rozkład namagnesowania materiału $M(x,y,z)$ i pola magnetycznego $B_p(x,y,z)$ w pobliżu badanego obiektu. Tak więc to, co jest rejestrowane przez magnetometr, to związek pomiędzy namagnesowaniem materiału (magnetyzacją) M , natężeniem zewnętrznego pola magnetycznego H i indukcją magnetyczną B , który opisuje konstytutywne prawo wyrażone równaniem: $B = \mu H = \mu_0(H + M)$ (4).

4.3.2.3. Zjawiska magnetomechaniczne.

Istnienie związku pomiędzy magnetyzacją M , natężeniem zewnętrznego pola magnetycznego H i indukcją magnetyczną jest naukową podstawą wszystkich magnetycznych metod badań

nieniszczących i monitorowania konstrukcji: aktywnych, w których wprowadzane jest znane wymuszenie w postaci składowej stałej lub zmiennej pola magnetycznego (m.in. MT - Magnetic-particle inspection, MFL - Magnetic flux leakage, ET - Electromagnetic testing, PEC – Pulse Eddy Current, szum Barkhausena, przetworniki magnetostrykcyjne) oraz pasywnych, w których obserwację prowadzi się w ziemskim polu magnetycznym (MPM, magnetowizja, przetworniki magnetostrykcyjne).

Uogólniając, możemy wyróżnić trzy oddziaływania powodujące zmianę namagnesowania, które będą zachodziły zgodnie z opisanymi wcześniej procesami domenowymi:

- naprężeniowe przez odkształcenie (zmiana odkształceń w zakresie sprężystym lub/i plastycznym);
- termiczne (oziebianie materiału z temperatury wyższej od temperatury Curie);
- elektromagnetyczne (oddziaływanie zewnętrznym polem magnetycznym).

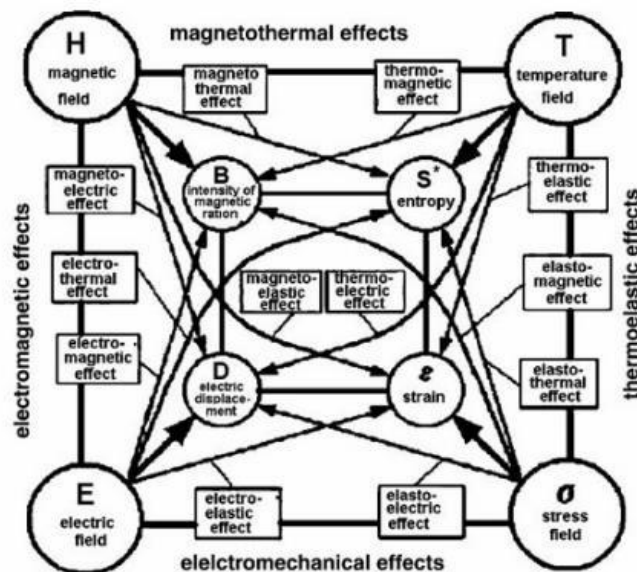
Magnesowanie elektromagnetyczne jest charakterystyczne dla metod aktywnych, temperaturowe będzie się ujawniało w przypadku warunków zbliżonych do wartości temperatury Curie (Tabela 3), natomiast w przypadku obszaru metod pasywnych kluczowe jest magnesowanie naprężeniowe.

Tabela. 3. Przykładowe wartości temperatury Curie.

Materiał	NiSi5	NiSi1	Ni	Stopy żelaza	Co
Temperatura Curie	45° C	320° C	35 8° C	723°C + 770°C (650° C -s- 870° C)	1127° C

Jak już stwierdziłem i udowodniłem w moich pracach (**P04, P08**), magnesowanie naprężeniowe materiału w słabym stałym polu magnetycznym różni się zasadniczo od magnesowania technicznego z wykorzystaniem silnego stałego lub zmiennego pola magnetycznego, stosowanego obecnie w badaniach NDT. Moje badania dowodzą, że poznanie tych różnic jest podstawą ilościowego i jakościowego interpretowania danych pomiarowych i świadomego wykorzystania pasywnego obserwatora stanu w diagnozowaniu obiektów technicznych.

Podstawą naprężeniowego magnesowania materiałów ferromagnetycznych (np.: konstrukcji stalowych) jest sprzężenie występujące pomiędzy siatką krystaliczną i spinami jonów tworzących komórkę elementarną (ang. L – S coupling). Sprzężenie to nazywamy piezomagnetyzmem i możemy obserwować je w postaci zjawiska magnetostrykcji – zmiany wymiarów elementu pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego oraz zjawiska mechanostrykcji – zmiany namagnesowania materiału pod wpływem odkształceń. Ilościowe jak i jakościowe zmiany stanu namagnesowania badanego elementu są sprzężone z efektami termicznymi, elektrycznymi i mechanicznymi struktury (komórki elementarnej, polikrystalitu, mikro- i makro-struktury), co odwzorowuje diagram Hackmanna (Rysunek 3.).



Rysunek 3. Diagram Hackmanna.

Diagram ujawnia złożone sprzężenia występujące pomiędzy wymuszeniami i odpowiedzią rzeczywistej struktury, których parametry opisują tensory deformacji, magnetostrykcji i piezomagnetyzmu. Obserwuje się złożone, wieloparametryczne nieliniowe relacje pomiędzy składem chemicznym, strukturą i naprężeniami, a magnetyzacją materiału. Jak już wspomniałem, rozwój procesów degradacyjnych wywołuje jakościową i ilościową zmianę efektów nieliniowych (związanych ze zmianą: gęstości dyslokacji, anizotropii strukturalnej i magnetycznej oraz fazami struktury). Lokalne właściwości magnetyczne i elektryczne materiałów są skorelowane z fazami degradacji struktury. Taka wielorakość zależności oraz nieliniowe zachowania sprawiają, że do ich analizy i interpretacji potrzebne są modele, które uwypuklą najistotniejsze oddziaływania (zjawiska fizyczne) w magnesowaniu naprężeniowym.

Niemniej jednak, przyjmuje się, że zjawiska magnetyczne niosą informację o:

- subtelnym stanie energetycznym materiału (strukturze domenowej),
- deformacjach sieci krystalicznej (anizotropii strukturalnej i magnetycznej),
- mikrostrukturze materiału (niejednorodnościach, fazach, pęknięciach).

Stwierdzając, że stan energetyczny materiału wpływa na przestrzenny rozkład domen magnetycznych w ferromagnetyku i rozkład pola magnetycznego w pobliżu badanego elementu, słuszne jest posłużyć się modelem energetycznym. Magnesowanie naprężeniowe zakłada zmianę wartości parametrów magnetycznych magnetyka pod wpływem naprężeń mechanicznych powodowanych siłami zewnętrznymi. Zjawisko to można interpretować na podstawie analizy zmian całkowitej energii swobodnej magnetyka. Całkowita energia swobodna E magnetyka w obecności pola magnesującego i naprężeń może być zapisana jako suma poszczególnych składowych tej energii:

$$E = E_H + E_D + E_R + E_\sigma + E_w \quad (5)$$

przy czym: E_H jest energią magnetostatyczną magnetyka w polu H , E_D energią odmagnesowania związaną z własnym polem próbki, E_R energią anizotropii, E_σ energią magnetosprężystą związaną z obecnością naprężeń w próbce oraz E_w energią wymiany.

Zgodnie z tą interpretacją, efekty magnetomechaniczne mogą być obserwowane, między innymi, jako zmiana indukcji magnetycznej B w zależności od naprężeń σ . przy ustalonych wartościach pola magnesującego H , charakterystyki magnetomechanicznej $B(\pm\sigma)H$. Analiza tak opisanego modelu wraz z wykonaniem odpowiednich eksperymentów i szczegółowych analiz dostarczyła wielu cennych wniosków dotyczących magnesowania naprężeniowego (**P01, P04, P08**), np.: z równania na energię magnetosprężystą wynika, że najmniejszą energię ma układ wówczas, gdy magnetyzacja jest równoległa do naprężeń rozciągających. Potwierdzają to wyniki badań, które pokazują, że w zależności od kierunku pomiaru, zmiana stanu naprężeń jest różnie skorelowana ze zmianą pola magnetycznego. Ponadto stwierdzono, że rozkład pola magnetycznego, daje nadzieję na określanie stanu naprężeń z odległości przy odpowiednim ustawieniu toru pomiarowego. Aby osiągnąć dobre wyniki, w badaniach należy starannie analizować właściwości magnetyczne materiału, z którego jest wykonany obiekt, jego kształt, strukturę, wymiary jak również położenie geograficzne i względną jego orientację. Wpływ rodzaju materiału został potwierdzony i jest zgodny z obecnymi wynikami badań w świecie. Wpływ kształtu/wymiarów to kolejny bardzo ważny czynnik. Ma on wpływ na ilościową zmianę własnego pola magnetycznego obciążanej próbki. Dodatkowo dowiedziono wysokiej czułości pomiaru magnetycznego, która ujawniła się przez wykrycie niejednorodnego rozkładu w próbce o przekroju poprzecznym w kształcie prostokąta. To zaobserwowane zjawisko, potwierdzone przez pomiar tensometryczny, stwarza możliwości dokładnego zbadania rozkładu naprężeń.

Zgodnie z istniejącą i zdobytą wiedzą, chcąc jak najprościej opisać rejestrowaną zmianę stanu magnetyzacji, dochodzimy do wniosku, że lokalny gradient pola magnetycznego wynika z kombinacji czterech czynników: mikrostruktury, namagnesowania resztkowego, geometrii obiektu oraz stanu naprężeń. W rozważanym przypadku ostatni z wymienionych czynników, choć najistotniejszy inżyniersko, wpływa najsłabiej na charakterystykę pola rozproszonego. W konsekwencji nie ma możliwości utworzenia funkcji odwrotnej służącej jednoznaczemu wyznaczeniu lokalnych naprężeń według metodyki, którą reprezentuje MPM. W moim odczuciu metoda MPM jest tym skuteczniejsza im diagnosta ma większe doświadczenie w stosowaniu metody oraz badaniu konkretnych obiektów w powtarzalnych warunkach. W świetle moich osiągnięć w obszarze pasywnych metod magnetycznych wynika, że współczesna wiedza z zakresu nieinwazyjnych metod diagnostycznych nie może opierać się wyłącznie na „intuicji i wiedzy eksperta dotyczącej wąskiej dyscypliny naukowej/technicznej”, a bazując na badaniach podstawowych, powinna być rozbudowana o złożone multidyscyplinarne sposoby modelowania obiektów wraz z ich uszkodzeniami, przetwarzaniem oraz wnioskowaniem diagnostycznym.

Posiadając wystarczającą zdobytą i zweryfikowaną wiedzę na temat możliwych sposobów zmiany stanu namagnesowania, mogłem zdefiniować model zachowania się obiektu (efektów magnetomechanicznych) w słabym ziemskim polu magnetycznym. Zmiana magnetyzacji będzie skutkiem procesów anizotropowych takich jak: przemieszczanie ścian domen oraz obrót momentów magnetycznych domen - będzie więc wynikiem deformacji siatki krystalograficznej co zmieni jej stan energetyczny. W zakresie silnych pól magnetycznych ($>H_s$), kiedy momenty wszystkich domen są już skierowane w kierunku przyłożonego wymuszenia, dalszy wzrost namagnesowania odbywa się poprzez objętościowe zmiany domen magnetycznych. Całość można opisać równaniem wyrażającym magnetyzację o charakterze odwracalnym:

$$M_{rev}(\sigma, t) = M_{dir}(\sigma, t) + M_{vol}(\sigma, t) \stackrel{H \ll H_S}{\cong} M_{dir}(\sigma, t) \quad (6)$$

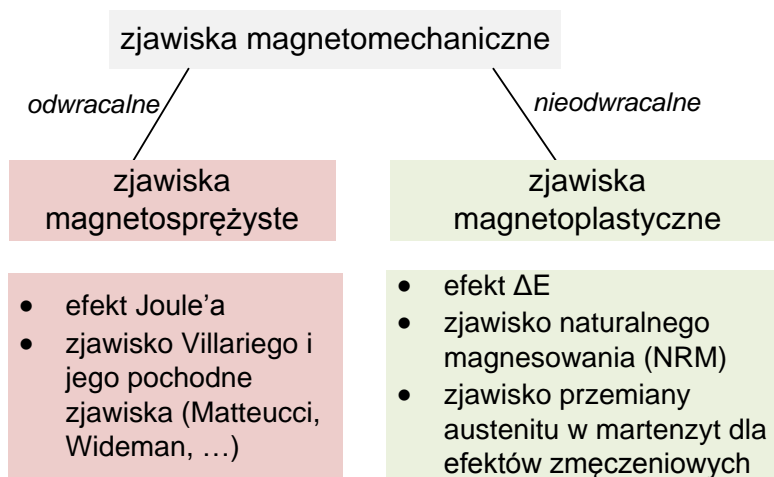
gdzie: M_{dir} – magnesowanie kierunkowe, M_{vol} – magnesowanie objętościowe.

Dodatkowo można wyróżnić wpływ poziomu i historii obciążeń, które też będą wpływać na zachowanie magnetyczne materiału. Jest to efekt nieodwracalny obserwowany po odciążeniu obiektu: $M_{irr}(\sigma = 0, t)$.

Biorąc pod uwagę właściwości magnetyczne stalowych materiałów konstrukcyjnych oraz wartości naturalnego pola magnetycznego Ziemi, można pominąć składową magnesowania objętościowego M_{vol} . Zatem, bieżący stan magnetyzacji obiektu (materiału) można wyrazić jako wypadkową procesu odwracalnego magnesowania kierunkowego i magnesowania nieodwracalnego:

$$M(\sigma, t) = M_{dir}(\sigma, t) + M_{irr}(\sigma = 0, t) \quad (7)$$

Upraszczając model numeryczny magnesowania naprężeniowego w słabym polu magnetycznym, który jest bardzo złożony w porównaniu do magnesowania technicznego, zaproponowałem podział ogólny i potrzebę uwzględnienia oraz rozdzielania zarówno efektów odwracalnych (efektu Villariego i jego pochodnych) i nieodwracalnych (efekt ΔE , rozpraszanie energii przez szum Barkhausena, zmiana namagnesowania obserwowana po odciążeniu materiału, przemiany fazowej austenit-martenzyt) – rysunek 4. Podział ten jest zgodny z potwierdzonym eksperymentalnie mechanizmem odwracalnego przesuwania domen oraz nieodwracalnych ich obrotów.



Rysunek 4. Podział zjawisk magnetomechanicznych.

Podział ten można zapisać w postaci analitycznej:

$$M(\sigma, t) = M_{dir}(\sigma, t) + M_{irr}(\sigma = 0, t)$$

$$\mu_0 \left(\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)_{\mathbf{H}} = \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right)_{\mathbf{H}} = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{H}} \right)_{\boldsymbol{\sigma}} \quad M = \chi H + \nu H^2 \quad (8)$$

Konsekwencją przyjętego podziału jest stwierdzenie, że dla zagadnień magneto-sprężystych wpływ naprężeń na modulację indukcji magnetycznej wytwarzanej przez obiekt w stałym zewnętrznym polu magnetycznym jest równy zmianom magnetostrykcji pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego przy stałym poziomie naprężeń. Natomiast dla obszaru, który nazwałem, obszarem zjawisk magnetoplastycznych, magnetyzacja jest odpowiednio powiększana proporcjonalnie do ilości cykli wymuszeń mechanicznych. W związku z tak zaproponowanym modelem wprowadziłem do słownika pojęcie własnego pola magnetycznego (eigenmagnetic field) jako globalny sygnał pola magnetycznego odbieranego przez magnetometr, określający zachowanie magnetosprężyste aktywowanego materiału w słabym polu magnetycznym otaczającym materiał. Pojęcie jest szersze niż rozproszone pole magnetyczne bo uwzględnia złożone efekty odwracalne i nieodwracalne. Zaproponowana wielkość została przyjęta w środowisku IEEE Magnetics Society zrzeszającej naukowców światowej sławy (D.C. Jiles, M.J. Sablik, G. Bertotti, ...) zajmujących się magnetyzmem, w tym efektami magnetomechanicznymi.

Nowoutworzone pojęcie pozwala objąć swoim zakresem większą liczbę zjawisk fizycznych, które dokładniej opisują stan naprężeń i wyężenia materiału. Jest to niewątpliwie zaletą, ale żeby dotrzeć do tych szczegółowych informacji należy przede wszystkim rozszerzyć sposób swojej obserwacji do wszystkich składowych pola magnetycznego (w przypadku MPR wystarczą dwie składowe) oraz posłużyć się odpowiednimi technikami, które pozwolą odseparować interesujące nas z punktu widzenia wytrzymałościowego efekty. W tym celu opracowałem odpowiednią metodę, która została szczegółowo opisana w pracy **(P08)**. Punktem wyjścia był modelowy opis zjawisk odwracalnych/nieodwracalnych, wyrażonych równaniem:

$$M_P = S \cdot (R \cdot M_E + B) \quad (9)$$

który opisuje pomiar pola magnetycznego M_P zrealizowany w bliskiej odległości od próbki. Na wartość tego pomiaru składają się składowa ziemskiego pola magnetycznego M_E oraz składowa B powstała na skutek trwałego namagnesowania próbki. Macierz diagonalna S określa wpływ bliskiej odległości materiału magnetycznego o $u \geq 1$. Macierz R reprezentuje transformacje składowych pola magnetycznego ziemskiego w układzie inercyjnym do lokalnego pola magnetycznego obserwowanego w układzie względnym, związanym z badaną próbką. Rozwiązując opisane równanie udało się teoretycznie i praktycznie odseparować nabytą remanencję magnetyczną próbki od wielkości mogącej być utożsamioną ze zmianą przenikalności magnetycznej jej materiału. Te niewielkie zmiany w interakcji z polem magnetycznym Ziemi dają znaczący sygnał w postaci indukcji pola magnetycznego w pobliżu próbki, który może być rejestrowany i analizowany pod kątem diagnostycznym. Te spostrzeżenie po głębszej analizie doprowadziło do fizycznego, matematycznie zdefiniowanego opisu. Otóż własne pole magnetyczne obiektu można wyrazić zależnością:

$$H = -\nabla(w) \quad (10)$$

gdzie 'w' to potencjał magnetyczny, który jest funkcją gradientu magnetyzacji M :

$$w = \text{div } M. \quad (11)$$

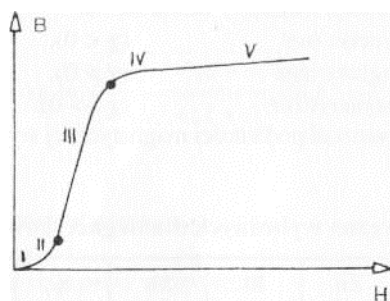
Z tego wynika, że własne pole magnetyczne obiektu H , np. mierzone magnetometrem, zależy od magnetyzacji obiektu oraz od rozkładu tej wielkości w przestrzeni. Wynika z tego, że

magnetyzacja badanego elementu M może być pośrednio i zdalnie obserwowana przez pasywny obserwator stanu – (badany element zmienia rozkład pola magnetycznego B wokół siebie). Pomiar i analiza przestrzennego rozkładu pola magnetycznego w pobliżu badanego elementu (zagadnienie magnetostatyki dla nieruchomego obiektu lub magnetodynamiki dla ruchomego obiektu) stanowi pośrednią ideę. W związku z tym podejściem, w swojej pracy używam różnych podejść do rejestracji sygnału magnetycznego. Są nimi: skanowanie powierzchni materiału (**P01, P08, P12**), pomiar w punkcie, jak najbliżej badanego miejsca (**P01, P04, P08, P12**), pomiar przestrzenny w punkcie (**P02, P03, P05, P06, P07, P11**) lub wzdłuż pewnej trajektorii (**P09, P10**).

Główna trudność w wykorzystywaniu magnetycznych metod pasywnych tkwi w tym, że diagnostycznie istotne informacje znajdują się w zakresie słabych pól magnetycznych oraz faktu wielorakości wpływu czynników zewnętrznych jak i uwarunkowań wewnętrznych materiału na zachowanie się obiektu w rozpatrywanym zakresie pól. Dlatego też, niewątpliwie prawdą jest to, że odpowiednia rejestracja sygnałów magnetycznych, poprzez dalsze przetwarzanie, analizę i interpretację, stoi u podstaw rozwinięcia możliwości pasywnych metod diagnostycznych.

4.3.2.4. Histereza.

Wspomniana trudność dotycząca poruszania się w zakresie słabych pól magnetycznych ogranicza cały zakres magnesowania materiału ferromagnetycznego do dwóch pierwszych obszarów zaznaczonych na Rysunku 5. Będzie to tak zwany zakres słabych pól oraz ewentualnie obszar Rayleigha.




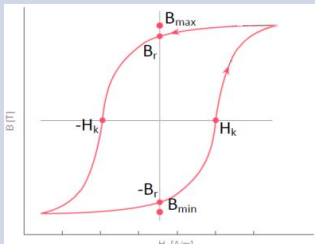
- I zakres słabych pól,
- II obszar Rayleigha,
- III obszar największych przenikalności,
- IV obszar bliski nasyceniu,
- V obszar nasycenia (obszar paraprocesu).

Rysunek 5. Krzywa pierwotnego magnesowania materiału ferromagnetycznego.

Dodatkowo, zgodnie z teorią magnesowania technicznego, w obszarze I, słabych pól magnetycznych, przemiany w ferromagnetykach są liniowe i odwracalne (nie występuje histereza magnetyczna), a w obszarze II, Rayleigha przemiany w ferromagnetyku są nieodwracalne (występuje histereza magnetyczna - pętle histerezy mają kształt soczewkowy). Sytuacja zmieni się gdy weźmiemy pod uwagę efekty magnetosprężyste. Okazuje się bowiem, że można zdefiniować histerezę magnetomechaniczną, która jest reprezentatywnym obrazem zarówno zjawisk liniowych jak i nieliniowych zachodzących w materiale znajdującym się w obszarze oddziaływania słabych pól, pod wpływem obciążeń mechanicznych.

W tym zagadnieniu również skuteczna okazała się metodyka bazująca m.in. na formułowaniu hipotez za pomocą analogii (Rysunek 6). Prawdą jest, że w każdym dynamicznym systemie liniowym, jego dynamika powoduje tworzenie się pętli pomiędzy sygnałem wejściowym, a

wyjściowym przy założeniu, że częstotliwość wymuszenia jest różna od zera. Wraz ze zbliżaniem się częstotliwości sygnału wejściowego do zera, pętla zanika. Dla niektórych nieliniowych układów pętla histerezy istnieje i nie zanika nawet, gdy częstotliwość wymuszenia dąży do zera. I ostatni przypadek dotyczy systemów charakteryzujących się naturalną nieliniowością (wewnętrzne nieliniowe zjawiska), dla których histereza pomiędzy sygnałem wejścia i wyjścia istnieje nawet dla częstotliwości asymptotycznie malejących. Przeprowadzone analizy doprowadziły do stwierdzenia, że histerezy nie można przyporządkować wyłącznie dynamice ani statyce. Pętla histerezy jest pewnym charakterystycznym obrazem zależności wejścia i wyjścia systemu (układu), przy założeniu okresowego wymuszenia. Dodatkowo możemy wyróżnić dwa przypadki (typy) histerezy: niezależną od częstotliwości wymuszenia oraz zależną od tej częstotliwości.

$B = \mu \cdot H$	$B = \mu(T, \sigma, \varepsilon, n_{\sigma}, A) \cdot H$
histereza	Histereza magneto-mechaniczna
	Dodatkowa informacja
	Efekty magneto-mechaniczne: <ul style="list-style-type: none"> - efekty krzyżowe - magnetostatyczna natura zjawisk (jaki powinno być obciążenie?) - zjawiska nieliniowe - ściskanie lub rozciąganie (efekt jednostronny)

Rysunek 6. Zestawienie histerezy magnetycznej z histerezą magnetomechaniczną.

Przeprowadzone badania doprowadziły do zdefiniowania histerezy magnetomechanicznej. Otóż pod wpływem działania sił mechanicznych zachodzą pewne zjawiska o charakterze magnetostatycznym. Zidentyfikowana histereza związana jest ze specyficzną charakterystyką magnesowania materiału ferromagnetycznego, w stałym polu magnetycznym Ziemi, przy zmiennych obciążeniach:

$$B = \mu(\sigma) \cdot (H + M), H, M = „const” \rightarrow B = f(\sigma) \text{ ponieważ } \mu = f(F).$$

Kształt histerezy zależy ściśle od charakteru obciążenia materiału, który określa charakterystyczne punkty pętli. Dokonując cyklicznego obciążenia ferromagnetyka od wartości σ_{\min} do σ_{\max} i z powrotem od σ_{\max} do σ_{\min} , otrzymujemy (właściwą dla danego materiału) zamkniętą pętlę. Jeśli histereza nie będzie osiągać wartości maksymalnych dla danego materiału, dla ustalonych warunków, to wtedy kształt pętli będzie zbliżony do wydłużonej elipsy (będzie to sytuacja, dla której krańcowe punkty pętli histerezy nie będą wchodzić w obszar nasycenia magnetycznego). Jednakże każda zmiana wielkości naprężeń w materiale w zakresie odkształceń sprężystych będzie zmieniać kształt i pole, dążąc do klasycznego kształtu histerezy. Uwzględniając wielkość pola np., biorąc jako parametr szerokość otrzymywanej pętli, można oszacować wielkość działających naprężeń w materiale ferromagnetycznym. Mając zaś na uwadze względne zmiany położenia histerezy (miejsce jej charakterystycznych punktów), które są konsekwencją wzrastającego poziomu obciążeń, możemy

określić stan wyężenia materiału (wymienione parametry diagnostyczne są chronione patentem – **(P04)**). Przyrost strumienia indukcji pola magnetycznego będzie się więc wyrażał wzorem: $d\Phi = d(BS)$, gdzie B jest indukcją pola magnetycznego materiału ferromagnetycznego, która w sposób histerezy zależy od zmiennego stanu naprężeń w materiale. Rozważając naturę powstałej pętli histerezy przyjmijmy, że $f = \frac{1}{T}$. Odpowiednio, gdy $f \rightarrow 0$, to wtedy $T \rightarrow \infty$. Jak wynika z badań i analizy zjawiska przy $f \rightarrow 0$ pętla histerezy nie znika, ponieważ $H_T(u) \rightarrow H_\infty(u)$ dla $T \rightarrow \infty$, zatem $H_\infty(u)$ posiada (u, y_1) , (u, y_2) takie, że $y_1 \neq y_2$ a więc potwierdza to definicję systemu z histerezą. Oznacza to, iż pętla histerezy została stworzona na skutek właściwości systemu, przy założeniu okresowego sygnału wejściowego klasy C_0 .

Histereza magnetomechaniczna, za sprawą specyficznego magnesowania naprężeniowego niesie ze sobą informacje o stanie naprężeń panujących w danym materiale. Kontynuując obrany kierunek, biorąc pod uwagę wszechobecną występowalność oraz zróżnicowane właściwości pętli histerezy można dojść do uogólnienia, gdzie histereza może stać się podstawą modelu diagnostycznego i otworzyć całą nową grupę pasywnych metod diagnostycznych dla obiektów pracujących dynamicznie lub quazistatycznie. Proponowaną techniką do uzyskania założonego celu odnośnie wykorzystania zjawiska pętli histerezy w diagnostyce technicznej, może być metaforyczne jej rozumienie i pozyskanie odpowiedniej wiedzy za pomocą analogii w taki sposób, aby umożliwić przejście/przeniesienie metodyki diagnozowania. W celu rozwiązania proponowanego zagadnienia opracowałem matematyczny model bazujący na transformacji energii niesionej przez sygnał wejściowy, który może sprostać założonym celom **(P06, P08)**.

Dalsze badania nad obiektami charakteryzującymi się dynamiką, doprowadziły do konfrontacji z klasycznym modelem magnesowania. W modelu według Bertottiego pole powierzchni histerezy w przypadku okresowej zmiany indukcji magnetycznej, przypadającej na jeden cykl sygnału wymuszającego, zależy od częstości zmian i może być opisane wzorem:

$$\Delta E_d = C_0 + C_1\omega + C_2\omega^{1/2} \quad (12)$$

gdzie C_0, C_1 i C_2 są stałymi materiałowymi, a ω częstością zmian sygnału wymuszającego. W przypadku, dla bardzo małych prędkości zmian sygnału wejściowego (wymuszenia obciążeniem), współczynniki C_1 i C_2 można pominąć, ale w przypadku większych częstotliwości (powyżej 4Hz) histereza magnetomechaniczna będzie odpowiednio modyfikowana i nie będzie to miało związku ze zmianą stanu wyężenia, a jedynie z dynamiką układu – prawdopodobnie mamy tutaj do czynienia z tzw. lepkością magnetyczną. Dodatkowo można spodziewać się efektu wzbudzenia prądów wirowych, lecz dla rozpatrywanych wciąż stosunkowo małych częstości wymuszenia efekt ten również można pominąć.

Podsumowując, jeśli zostaną spełnione warunki dotyczące sygnału wejściowego wynikające z definicji histerezy, to model wygeneruje pętle histerezy zależną/niezależną od częstotliwości sygnału wymuszającego oraz zawsze zależną od wartości funkcji wejściowej. Wprowadzenie pojęcia histerezy magnetomechanicznej otwiera cały wachlarz nowych możliwości analizy efektów magnetomechanicznych prowadzących do cennych informacji diagnostycznych. Jednym z ciekawszych i nowatorskich zastosowań jest możliwość wnioskowania o pracy i

uszkodzeniach przekładni zębatych (**P08**). Ponieważ informacje zawarte w rejestrowanym sygnale pola magnetycznego są kilkukrotnie mniejsze niż poziom panujących szumów, kluczowe okazało się zastosowanie algorytmu uśredniania synchronicznego i procedury segmentacji sygnału. To umożliwiło obserwację zmian pola na lokalnej płaszczyźnie zazębienia. Dysponując sygnałem reprezentującym mechaniczną dynamikę pracy przekładni (nierównomierność prędkości obrotowej, sygnał drganiowy), można zbudować zdefiniowaną wcześniej histerezę magnetomechaniczną będącą lokalnym obrazem zjawisk magnetomechanicznych zachodzących w kolejnych współpracujących parach zębów.

4.3.3. Omówienie osiągniętych wyników w zakresie badań nad konstrukcjami oraz pojazdami.

Prace oznaczone odpowiednio symbolami: (**P02, P03, P05, P06, P07, P10, P11**) stanowią **przejście od badań podstawowych do konkretnych obiektów takich jak: stalowe konstrukcje, maszyny oraz pojazdy**. Prezentują wciąż to samo pasywne podejście do technik magnetycznych. Wskazane prace obejmują publikacje dotyczące diagnozowania konstrukcji stalowych poprzez przedstawienie koncepcji monitoringu z udziałem sensorów pola magnetycznego (**P02**), proponują konkretne rozwiązanie użycia sieci magnetometrów i ich kalibracji (**P07**) oraz dodatkowe wsparcie diagnozowania przy użyciu modelu histerezy magnetomechanicznej (**P06**). Kolejne prace podejmują tematykę wykrywania, przetwarzania oraz wspartej modelowo analizy anomalii magnetycznych związanych z ruchem pojazdów samochodowych (**P03, P05**) w tym możliwości zdalnego wykrywania zjawisk magnetomechanicznych przy zderzeniu pojazdów (**P11**). Natomiast publikacja (**P10**) rozszerza tematykę o rozważenie pojazdów jako źródło pól elektromagnetycznych, wskazuje ewentualne zagrożenia środowiskowe i równocześnie proponuje miary służące właściwemu z tego punktu widzenia opisowi tych zagrożeń (**P10**).

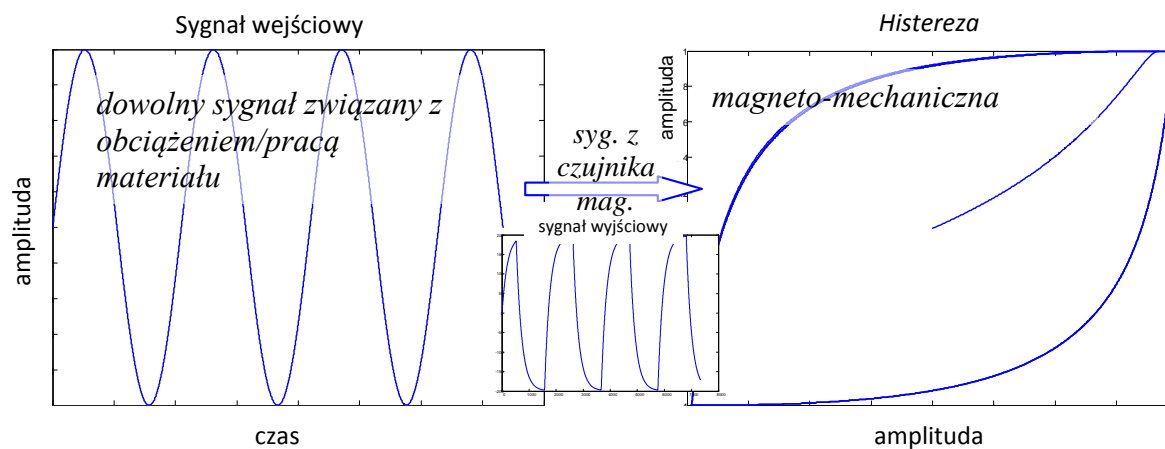
4.3.3.1. Konstrukcje.

Koncepcja aplikacji pasywnych metod magnetycznych do diagnozowania konstrukcji stalowych zakłada rozproszony system diagnostyczny ze zdolnościami do monitoringu SHM (**P02, P06**). Zaprojektowany i wykonany testowy system składa się z przetworników tensometrycznych oraz czujników pola magnetycznego. Oprócz czujników transduktorowych zastosowano bardzo korzystny ekonomicznie element magnetorezystancyjny, który w technologii MEMS zintegrowano z czujnikiem akcelerometrycznym. Taka konstrukcja pozwala oprócz akwizycji zaburzeń pola magnetycznego uzyskać sygnał przyspieszenia, który może zostać przeliczony na kąt obrotu czujnika (z dokładnością 0,05 stopnia). Jest to informacja istotna sama w sobie ze względu na nieruchome zamontowanie czujnika zespolonego z konstrukcją jak i jest pomocna przy interpretacji zmian pola magnetycznego. Każda taka jednostka pomiarowa może pracować w sieci CAN co umożliwia tworzenie rozległych sieci sensorycznych.

Weryfikacja systemu odbyła się w pierwszej kolejności na stanowisku laboratoryjnym, które składało się z badanej konstrukcji przestrzennej hali, której kolejne przęsła były odpowiednimi kratownicami tworzącymi jej system nośny. Odpowiedni układ hydrauliczny realizował jej

obciążanie. Kratownica była obciążana do momentu wystąpienia jej wyboczenia. Pasywna obserwacja zmian pola magnetycznego odbywała się bezpośrednio na obiekcie jak również z pewnej odległości od wytypowanych przez analizę MES węzłów krytycznych konstrukcji. Wyniki (P06) potwierdzają, że stan polaryzacji magnetycznej konstrukcji (rozkład namagnesowania) jest nośnikiem informacji diagnostycznej o poziomie wyętwienia materiału. Możliwe jest pozyskanie tej informacji diagnostycznej poprzez zdalny, bezdotykowy pomiar pola magnetycznego w pobliżu badanej konstrukcji. Poziom obserwacji wspomnianych efektów był skorelowany z odległością od miejsca koncentracji naprężeń w kratownicy. Pod wpływem przyłożonego obciążenia elementy kratownicy podlegały magnesowaniu naprężeniowemu w kierunku osi łatwego magnesowania najbliższej położonej do kierunku przyłożonego obciążenia (P02). W efekcie wektor magnetyzacji M i indukcji magnetycznej B na powierzchni materiału ulegały przestrzennej zmianie (zmiany amplitudy i kątów). Do ilościowej i jakościowej analizy zmian M i B niezbędne jest stosowanie czujników rejestrujących trzy składowe pola magnetycznego. Uproszczony tor pomiarowy (uwzględniający całkowitą długość wektora indukcji magnetycznej) może być stosowany tylko do detekcji końcowej fazy uplastycznienia materiału i pęknięcia. Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość budowy systemu SHM dla konstrukcji z użyciem czujników pola magnetycznego. Wymaga to natomiast uwzględnienia wpływu: właściwości magnetycznych danego typu materiału, cech geometrycznych badanego elementu, położenia obiektu badań (współrzędnych geograficznych i położenia kąтового w lokalnym układzie współrzędnych na oczekiwane symptomy diagnostyczne i ryzyko wystąpienia fałszywych wskazań.

Rozważając możliwości diagnozowania konstrukcji stalowych, wzięto pod uwagę wykorzystanie opisanej wcześniej histerezy magnetomechanicznej. Przeprowadzone analizy doprowadziły to wniosku, że niezbędny jest pewien oscylacyjny przebieg sygnału wejściowego związany bezpośrednio lub pośrednio z obciążeniem materiału (w przypadku hali może to być nawet siła i kierunek wiatru, lub wielkość opadu śniegu), który wprowadziłby niezbędną „dynamikę”, dzięki której zaistnieją wystarczające warunki do tworzenia się kształtu pętli histerezy magnetomechanicznej (Rysunek 7).



Rysunek 7. Schemat generowania histerezy magnetomechanicznej.

Wprowadzona dynamika do systemu spowodowała pojawienie się informacji diagnostycznej, która może być prawidłowo zinterpretowana jedynie pod warunkiem brania pod uwagę aktualnego

zachowania systemu. Każda zmiana wielkości naprężeń w materiale, w zakresie odkształceń sprężystych będzie zmieniać kształt i pole, dążąc wraz ze wzrostem obciążeń do klasycznego kształtu histerezy. Uwzględniając wielkość pola np., biorąc jako parametr szerokość otrzymywanej pętli, można oszacować wielkość działających naprężeń w materiale ferromagnetycznym. Mając zaś na uwadze względne zmiany położenia histerezy (miejsce jej charakterystycznych punktów), które są konsekwencją wzrastającego poziomu obciążeń, możemy określić stan wyężenia materiału. Odpowiedni model histerezy został opracowany (**P06**) oraz określono warunki, w jakich może on być zastosowany (użyty). Otrzymane wyniki potwierdzają duże możliwości zaproponowanego modelu histerezy wraz z telemonitoringiem zarówno wczesnych faz rozwoju uszkodzeń jak i detekcji uszkodzeń katastroficznych.

Opisany system został też przetestowany na obiekcie rzeczywistym co pozwoliło zidentyfikować oraz rozwiązać problem dotyczący doboru i stosowania czujników pola magnetycznego w diagnozowaniu stalowych konstrukcji (**P07**). Okazało się bowiem, że zmienne warunki środowiskowe różnie będą wpływać na otrzymywane wyniki w zależności od rodzaju i typu magnetometru. Temperatura okazała się czynnikiem najbardziej wpływającym na pomiar, dlatego też wykonano dodatkowy eksperyment w symulowanych warunkach w komorze środowiskowej. Dokonane porównania charakterystyk temperaturowych wskazują, że najstabilniejsze są czujniki transduktorowe, natomiast czujniki MRA wykazywały różne właściwości w zależności od konstrukcji czujnika i jego producenta. Niemniej jednak zależność temperaturowa to cecha, z którą należy liczyć się podczas pomiarów magnetometrycznych, dlatego opracowano metodę kalibracji temperaturowej czujników (**P07**). Symulacje wykazały, że autorska metoda jest wrażliwa na szum pomiarowy oraz dokładność estymacji pochodnej temperatury. Pochodna ta jest konieczna do wykonania obliczeń, a ponieważ jej wartość nie jest dostępna pomiarowo, konieczne jest jej estymowanie z wykorzystaniem estymatora wysokiego rzędu. W przeciwnym wypadku otrzymane rezultaty mogą znacząco różnić się od oczekiwanych wyników. Mając tego świadomość, otrzymujemy narzędzie niezbędne przy monitoringu i pomiarach pola magnetycznego w warunkach rzeczywistych konstrukcji będących pod wpływem oddziaływań środowiskowych. Jest to o tyle istotne, że informacyjnie diagnostyczne zmiany pola są mniejsze niż fluktuacje temperaturowe czujnika.

Podsumowując, efekty pracy umożliwiają optymalne podejście zarówno do zagadnienia akwizycji jak i przetwarzania sygnałów magnetycznych, w sposób dający szansę zauważenia niskoenergetycznych zmian związanych ze stanem naprężeń w materiale konstrukcji.

4.3.3.2. Pojazdy.

Odwołując się do zupełnie odmiennych obiektów technicznych, niezmiernie ciekawymi w podejściu magnetycznego pasywnego obserwatora stanu okazały się być poruszające pojazdy samochodowe. Obszar osiągnięć z tego zakresu badań obejmuje istotne zagadnienia z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkowników pojazdów, zarządzania systemem transportowym, monitorowania przemieszczających się pojazdów, a nawet wykrywania zdarzeń drogowych (wypadków). W obliczu obserwowanego wzrostu obciążenia systemu transportowego, zarówno w Polsce, Europie, jak i na całym świecie, istnieje potrzeba zwiększenia efektywności ruchu

drogowego oraz poprawa bezpieczeństwa użytkowników pojazdów powiązana z transportem infrastruktury. W tym celu można wyróżnić dwie drogi poszukiwania rozwiązań, które pozwolą sprostać wciąż uaktualnianym wymaganiom efektywności. Pierwsze podejście to budowa kolejnych szlaków komunikacyjnych, które w związku z ograniczonym miejscem na ich budowę przybierają formę wielopoziomowych dróg. Koszty takiego rozwiązania są bardzo wysokie, dlatego między innymi dostrzeżono potencjał w odpowiedniej kontroli ruchu na istniejących już szlakach komunikacyjnych (drugie podejście). Podstawą takiej kontroli jest zbiór bieżących informacji o pojazdach znajdujących się na drogach. –Podstawą funkcjonowania każdego systemu z grupy systemów ITS (Intelligent Transportation System), jest szeroko rozumiana „informacja” na temat funkcjonowania systemu transportowego. Pozyskiwanie informacji odbywa się za pomocą czujników, które obejmują swoim działaniem i właściwościami bardzo szeroki zakres zjawisk fizycznych:

- fale dźwiękowe (czujniki akustyczne),
- współczynnik pochłaniania/nieprzezroczystość (czujniki: podczerwieni, optyczne),
- geomagnetyzm (magnetometry),
- odbicia emitowanej energii (laserowy radar podczerwieni, czujniki ultradźwiękowe, radar mikrofalowy),
- indukcję elektromagnetyczną (pętle indukcyjne),
- drgania (sejsmika, czujniki przełącznikowe masowe),
- fale w różnych pasmach częstotliwości (nadajniki wykonane w technologii RFID (radio-frequency identification), nadajniki korzystające z sieci GSM).

Pożądane zadania realizowane na podstawie sygnałów z wymienionych czujników to kontrola sygnalizacją świetlną, zarządzanie liczbą samochodów dopuszczanych do użytkowania konkretnych odcinków dróg, przekazywanie ważnych dla kierowców informacji drogowych, wykrywanie zdarzeń drogowych (wypadków), wykrywanie zagęszczeń w ruchu drogowym, gromadzenie danych klasyfikujących użytkowników dróg. Dokonując szczegółowego przeglądu oraz analiz zjawisk fizycznych w kontekście pozyskiwania założonych informacji jak również biorąc pod uwagę aspekt ekonomiczny, określono słabe i mocne strony każdej techniki. Efektem tego opracowania było wytypowanie pasywnego podejścia do pomiaru zaburzeń pola magnetycznego jako optymalnego (**P03**), a dodatkowo, poprzez wykorzystanie efektów magnetomechanicznych, dotarcie do nowych informacji (**P05**). Wykazałem, że użyteczne zjawiska te formują się pod wpływem magnetycznego pola ziemskiego i mogą być powiązane ze stanem magnetycznym obiektu (magnetyzacją) w postaci pewnego obrazu (sygnatury) pola magnetycznego przyporządkowanego poruszającemu się obiektowi. Dalsze prace modelowe doprowadziły do złożonej zależności, którą zdecydowałem się uprościć w celach praktycznych i w rezultacie stwierdzam, że zarejestrowana sygnatura (anomalie) magnetyczna pojazdu jest wypadkową:

- objętości i rozmiarów masy ferromagnetycznej pojazdu (jego typu),
- właściwości magnetycznych głównego ferromagnetyka (przenikalności magnetycznej),
- odległości od czujnika,
- prędkości ruchu.

Przeprowadzone badania na obiektach rzeczywistych jednoznacznie potwierdzają, że pasywne podejście do zaburzeń pola magnetycznego od przejeżdżających pojazdów samochodowych

pozwała dotrzeć do informacji o kierunku poruszania, prędkości, wymiarach obiektu oraz prześwicie. W tym zakresie moje prace wzbogacają obszar badań o modelowe symulacje dotyczące możliwości określenia wysokości poruszającego się nad czujnikiem obiektu ferromagnetycznego. Artykuł (P05) dodatkowo dowodzi, że wymienione informacje mogą być osiągalne przy użyciu nawet tanich sensorów magnetorezystancyjnych, ale dopiero przy odpowiednich zmianach w przetwarzaniu sygnału.

Z analizy wyników przeprowadzonych badań wynika, że:

- Informacja na temat kierunku przejazdu samochodów jest zawarta co najmniej w zwrotach składowych poziomych wektora indukcji pola magnetycznego. Możliwe jest zatem określanie kierunku jazdy samochodu na podstawie analizy zmiany indukcji pola magnetycznego towarzyszącej przejazdowi pojazdu, zarejestrowanej przez pojedynczy magnetometr.

- Zamiast wykresu obrazującego pole anomalne całego samochodu wraz z oddziaływującym polem magnetycznym Ziemi, można otrzymać odseparowane pole anomalne pojazdu, a nawet jego głównych podzespołów. Tak postawiony problem dotyczy optymalizacji parametrów filtra, która powinna uwzględniać oczekiwaną długość samochodu oraz jego prędkość i powinna definiować długości okien w filtrach LPF (low pass filter) i HPF (high pass filter). Eliminacja składowej stałej sygnału oraz odpowiedni dobór parametrów filtra pozwala na wizualizację wypadkowego wpływu lokalnych anomalii, które mogą być wykorzystane do identyfikowania podzespołów samochodu. Bazując na tej obserwacji, można stworzyć pewne wzory reprezentantów grup pojazdów (np. samochód, ciężarówka, autobus) oraz zdefiniować reguły klasyfikacyjne, które umożliwiłyby szybką kategoryzację przejeżdżających pojazdów.

- Wykorzystując specyfikę użytej konfiguracji czujników (dwa jednakowe magnetometry oddalone od siebie o znaną długość), można przy pomocy metody punktów charakterystycznych obliczyć różnicę czasu między odpowiednimi punktami zarejestrowanymi przez każdy czujnik. Znając rozstaw magnetometrów, można obliczyć średnią prędkość, z jaką poruszał się samochód pomiędzy nimi. Zakładając i zauważając podobieństwo jakościowych zmian pola magnetycznego, możliwe jest wykorzystanie ekstremów zarejestrowanych sygnałów, np.: maksimów lub minimów.

- Analizując lokalne anomalie zgodnie z opracowaną w rozdziale metodyką, możliwe jest określenie rozmieszczenia i rozmiarów poszczególnych głównych podzespołów pojazdów. Dzięki analizie sygnału magnetycznego zarejestrowanego z dostatecznie dużą rozdzielczością, możemy uzyskać całkowity obraz zmiany indukcji pola magnetycznego, który po przeliczeniu osi czasu z uwzględnieniem prędkości, da informacje o wymiarach lokalnych anomalii i ich położeniu względem siebie. W wyniku takiej analizy otrzymujemy np. informacje o rozstawie wzdłużnym osi pojazdu oraz informacje o względnym położeniu jednostki napędowej samochodu.

- Interesującą z punktu widzenia monitoringu pojazdów jest informacja o całkowitej długości przejeżdżających pojazdów. Aby ją pozyskać, należy przetworzyć sygnały do takiej postaci, w której obserwujemy globalną anomalię związaną ze stanem polaryzacji samochodu jako pojedynczej bryły – innymi słowami: należy zredukować złożony kształt anomalii do anomalii odpowiadającej elementarnemu dipolowi.

- Z przeprowadzonych analiz wynika, że istnieje potencjalna szansa oszacowania wysokości przejazdu samochodu nad czujnikiem – byłaby to dodatkowa cenna informacja klasyfikująca przejeżdżające pojazdy.

Dodatkowo obszar badań wzbogaciłem o analizę efektów magnetomechanicznych w niezmiennym kontekście, czyli poruszających się samochodów. Obok właściwości mikrostruktury materiału, również stan odkształcenia sieci krystalograficznej wymuszony naprężeniem jest czynnikiem, który będzie miał bezpośredni wpływ na procesy magnesowania w ziemskim polu magnetycznym. Dzięki temu efektowi wskazano możliwość szacowania naprężeń w konstrukcji nośnej pojazdu, która może być związana na przykład z przewożonym ładunkiem. Stwierdzono również, że naprężenia zewnętrzne dzięki sprzężeniu magnetosprężystemu, zmieniają stan energetyczny i warunki równowagi układu domen magnetycznych, a tym samym modyfikują proces magnesowania. W odniesieniu do pojazdów, ich stan energetyczny domen zostanie zmodyfikowany w przypadku kolizji, w której ulegną odkształceniu stalowe elementy konstrukcyjne. Zderzenie tego typu w uproszczeniu można zaliczyć do niesprężystych, z uwagi na to, że energia mechaniczna nie jest zachowana. Część początkowej energii obu samochodów zamieni się na energię wewnętrzną (ciepło) oraz zużyta zostanie na pracę odkształcenia samochodów, które będzie miało odzwierciedlenie w obrazie magnetycznym. Ta hipoteza została zweryfikowana podczas eksperymentu centralnego zderzenia czołowego dwóch samochodów. Podczas zderzenia oprócz magnetometru ustawionego na wysokości zaplanowanego zderzenia w odległości 3 metrów od toru poruszających się pojazdów, zostały użyte sonometry rejestrujące ciśnienie akustyczne oraz akcelerometry we wnętrzu jednego ze zderzających się samochodów. Dodatkowo cały eksperyment został zarejestrowany przez „szybkostrzelną” kamerę. Dzięki tak zaplanowanemu doświadczeniu można było dokładnie przeanalizować zderzenie wyszczególniając charakterystyczne jego etapy/fazy. Udowodniono, że zjawiskom magnetomechanicznym, którym nieraz towarzyszą duże przemiany energii mechanicznej, wtórują subtelne anomalie magnetyczne w naturalnym polu magnetycznym Ziemi. W eksperymencie zderzeniowym dowiedziono, że mogą być one obserwowane nawet ze znacznej odległości. Na tej podstawie zostało opracowane zgłoszenie patentowe, które w sposób komplementarny zastrzega sposób automatycznego wykrywania zdarzeń drogowych na podstawie analizy sygnału magnetycznego i akustycznego. Celem wynalazku jest możliwość monitoringu płynności ruchu pojazdów w węzłach komunikacyjnych. Monitoring, według wynalazku, może być realizowany zarówno z boku jak i znad jezdni, czyli ponad pojazdami co umożliwi obserwację kilku pasów ruchu jednocześnie. W sposobie według wynalazku symptomem określenia wystąpienia kolizji pojazdów jest charakterystyczne zachowanie sygnału indukcji pola magnetycznego, które jest bezpośrednio związane ze zjawiskami magneto-mechanicznymi, ale jedynie pod warunkiem wystąpienia nagłego wzrostu poziomu sygnału akustycznego. Generowanie nagłego wysokiego poziomu sygnału akustycznego w czasie kolizji jest oczywiste, aczkolwiek istnieje szereg innych możliwości zaobserwowania takiego zachowania. Dlatego niezbędne jest użycie układu pomiarowego z dodatkowym sensorem, magnetometrem, który rozstrzygnie zaistniałą sytuację. Rozwiązanie według wynalazku pozwala na automatyczne uzyskanie informacji o wystąpieniu kolizji pojazdów w danym obszarze obserwacji.

Wykorzystując zdobytą wiedzę na temat efektów krzyżowych rozszerzyłem zakres badań dotyczących pojazdów o samochody elektryczne i hybrydowe. Fakt pasywnego podejścia do rejestracji zastanego pola magnetycznego obiektów technicznych może mieć też negatywną stronę, jak choćby w przypadku emitowania pól elektromagnetycznych przez maszyny elektryczne. Przegląd literaturowy potwierdza, że zarówno skutki bezpośredniego wpływu na taką emisję nie są

jednoznacznie określone co również skutkuje brakiem jednolitych norm bezpieczeństwa. Natomiast ewidentne jest, że wraz z rozwojem nowoczesnych konstrukcji pojazdów elektrycznych i hybrydowych, człowiek będzie potencjalnie narażony na emisję EMF (Electromagnetic fields). Ciekawy jest fakt, że Izrael opracował specjalne normy dotyczące właśnie takich pojazdów. Moje rozumowanie, potwierdzone materiałem badawczym okazało się słuszne. Wykazałem bowiem, że w warunkach rzeczywistych na skutek nieliniowości w obwodzie magnetycznym stojana i wirnika, pojawi się znacznie większa liczba harmoniczných indukcji magnetycznej. Część tego pola nie zamknie się we wnętrzu silnika, ale obejmie przestrzeń wokół silnika i może oddziaływać bezpośrednio na człowieka. Zjawisko "wyciekania pola" poza objętość silnika jest powszechne. Natomiast dalsze analizy potwierdziły, że błędy mechaniczne takie jak, np. mimośrodowość mogą powodować z jednej strony generowanie dodatkowych składowych wirującego pola magnetycznego, z drugiej strony mogą prowadzić do zaburzenia istniejącej w silniku drogi magnetycznej, co w konsekwencji może prowadzić do pogorszenia parametrów obwodu magnetycznego silnika. To z kolei spowoduje zintensyfikowanie zjawiska "wyciekania pola". Istotne z punktu widzenia analizy silnika jako źródła zmiennego pola magnetycznego jest uwzględnienie aspektu przestrzennego. Przedstawiając sygnał magnetyczny w formie widma pozycyjno-częstotliwościowego dla niskiego i górnego zakresu częstotliwościowego, zależnie od miejsca pomiaru, można się spodziewać obserwowania różnych składowych widma, a co za tym idzie możliwości przekroczenia dopuszczalnych poziomów amplitud pola magnetycznego zależnego od tego, gdzie nastąpił pomiar/gdzie nastąpiła ekspozycja. W przypadku kilku różnych stopni mimośrodowości uwidacznia się efekt modulacji amplitud, który pogłębia się wraz ze wzrostem stopnia mimośrodowości. Im większa mimośrodowość tym większa zawartość harmoniczných. W związku z tym z punktu widzenia bezpieczeństwa oraz norm określających dopuszczalne poziomy amplitud emisji pól EMF w wybranych pasmach, pojawia się istotne pytanie, jak interpretować sytuację, gdy w danym zakresie częstotliwościowym, wymienianym w normie, pojawia się wiele harmoniczných. Nie jest to jednoznaczne, dlatego zaproponowano zastosowanie miary energetycznej stosowanej między innymi przez operator Teager-Kaiser'a, a który odnosi się bezpośrednio do amplitudy i częstotliwości sygnału. Jest to miara energetyczna, której podstawy odwołują się do energii prostego oscylatora harmonicznego. W przypadku sygnałów poliharmoniczných, energia liczona jest jako suma energii dla poszczególnych harmoniczných. Taka miara jest zatem wrażliwa zarówno na ilość harmoniczných, ich częstotliwość oraz amplitudę i dlatego wydaje się właściwa dla rozpatrywanego problemu. Korzystając z zaproponowanej miary, można było stwierdzić, że maksymalne wartości parametru energetycznego dla małych prędkości są blisko czterokrotnie mniejsze niż przy średnich prędkościach obrotowych silnika. Potwierdza to zgodność teorii z otrzymaną reprezentacją. Przechodząc od analizy silników elektrycznych do pojazdów, dodatkowo biorąc do porównania klasyczny pojazd z silnikiem diesla, zaobserwowałem następujące efekty:

- ujawniono bardzo silne oddziaływanie pola magnetycznego w okolicach przedniego koła. Poziom ten znacznie odbiega od innych zarejestrowanych pomiarów. Spowodowane jest to obracaniem obwodu w postaci zbrojenia opony w ziemskim polu magnetycznym;
- zarejestrowane poziomy energetyczne pola magnetycznego mają bardzo zbliżony poziom zarówno dla pojazdów elektrycznych jak i klasycznych pojazdów spalinowych. Aczkolwiek należy

pamiętać, że obecność błędów mechanicznych w silniku przyczynia się do zwiększenia emisji pola magnetycznego.

Podsumowując, przeprowadzone analizy ukazały możliwość wykorzystania pasywnych metod magnetycznych w monitoringu konstrukcji stalowych jak i przemieszczających się pojazdów. W toku przeprowadzonych badań i analiz dowiodłem, że zaproponowane podejście umożliwia uzyskanie informacji zarówno o funkcjonowaniu danego obiektu, jak i o samym obiekcie. Z roku na rok wzrasta potrzeba pozyskiwania szeroko rozumianej informacji, która stają się największą wartością umożliwiającą zarówno rozwój, jak i efektywne wykorzystanie systemów technicznych na które składają się konkretne obiekty techniczne. Dlatego warto wykorzystać tworzącą się szansę szerszego wykorzystania czujników magnetycznych w prezentowanym przeze mnie podejściu, pasywnym.

Efekty poznawcze z prowadzonych przeze mnie prac stanowią wkład w rozwój stanu wiedzy w zakresie pasywnych metod magnetycznych w diagnostyce technicznej, za najważniejsze z nich uważam:

- **wypracowanie własnej metodyki i środków opartych o mechanizm metafory i analogii do przyspieszonego rozwoju pasywnego podejścia w magnetycznych metodach diagnostycznych bazując na efektach krzyżowych;**
- **weryfikowanie istniejącej oraz rozwinięcie nowej wiedzy podstawowej na temat magnesowania naprężeniowego i efektów magnetomechanicznych ze szczególnym uwzględnieniem ich występowania w stalach konstrukcyjnych, w tym opracowanie paramagnetycznego stanowiska badawczego umożliwiającego badania zarówno wpływu obciążeń statycznych, quazistatycznych jak również dynamicznych (gigacyklowych);**
- **zaproponowanie oryginalnego podziału efektów magnetomechanicznych oraz metody ich separacji i interpretacji według przyjętego autorskiego modelu;**
- **opracowanie i rozwinięcie uogólnionego opisu efektów magnetomechanicznych w postaci histerezy magnetomechanicznej, którą można wykorzystać jako uogólniony model diagnostycznego do analizy dowolnego obiektu technicznego (wykonanego z materiału magnetycznego) poddanego dynamicznym lub quazistatycznym obciążeniom;**
- **opracowanie oraz weryfikacja metodologii wykorzystania pasywnego obserwatora pola magnetycznego w monitorowaniu pracy stalowych konstrukcji wielkogabarytowych oraz pojazdów wraz z ich napędami elektrycznymi.**

Omówione osiągnięcia w obszarze pasywnych metod magnetycznych wskazują na konkretne problemy badawcze i aplikacyjne, ale również możliwości ich rozwiązania oraz kierunek rozwoju. To wszystko sprawia, że przedstawiony szeroki wachlarz rozwijanych metod może sprostać nowym, bardziej wyrafinowanym, diagnostycznym wymaganiom, które przewidywane są na przyszłość, ale może nawet bardziej, istotne są dla współczesności. Żeby można było wykorzystać tę szansę, potrzebne jest budowanie komplementarnych zespołów badawczych, aby prace mogły przebiegać w tempie, które nie pozostawi nas (polską naukę) w tyle za zagranicznymi ośrodkami

badawczymi. Z uwagi na zapotrzebowanie przemysłu na takie metody przedstawiony kierunkiem badań i prac rozwojowych wydaje się być właściwy.

4.3.4. Wykorzystanie wyników pracy naukowo-badawczej.

Obrany przeze mnie kierunek prac naukowo-badawczych podejmuje w szerokim stopniu zagadnienia nowoczesnej diagnostyki niezbędnej do prowadzenia efektywnej strategii eksploatacji, poprzez wykorzystanie zjawisk magnetomechanicznych, jakie występują zarówno w maszynach jak i konstrukcjach architektonicznych dla najwcześniejszego wykrywania uszkodzeń, w początkowej ich fazie. Obszar mojej działalności ze względu na interdyscyplinarne, niestandardowe podejście metodologiczne i techniczne, poparte analizą teoretyczną modeli diagnostycznych, uwzględnia problemy i zapotrzebowanie przemysłu, jest ważne dla obronności i bezpieczeństwa kraju, energetyki, transportu czy infrastruktury budowlanej. Wymiernym tego efektem jest nadanie mi w 2014 roku tytułu Innowatora Mazowsza jako laureatowi szóstej edycji konkursu w kategorii Innowacyjny Młody Naukowiec, przyznawanego kreatywnym naukowcom, których prace zawierają innowacyjne, a jednocześnie praktyczne rozwiązania.

W trakcie realizacji prac w naturalny sposób ujawniło się zapotrzebowanie na wyniki moich badań w przemyśle transportowym, energetycznym oraz na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa. Potwierdza to zgodność z realizowaną polityką naukowo-techniczną i innowacyjną państwa przyjętą do roku 2020. Korzyść z takiego stanu rzeczy jest obopólna, gdyż dzięki niej miałem możliwość pracować i rozwijać swoje badania przy wielu projektach badawczych (krajowych oraz europejskich), które również dzięki potencjałowi poruszanej tematyki oraz dobrej jakości prowadzenia badań, odnosiły sukcesy merytoryczne jak i organizacyjne. W ostatnich 4 latach pełniłem odpowiedzialne, kierownicze oraz wykonawcze funkcje przy dwóch projektach finansowanych przez NCBiR (jeden z projektów wciąż trwa), które bezpośrednio powiązane są z rozwijaną przeze mnie dziedziną. Projekty skupiają wokół siebie przedstawicieli znaczących instytucji naukowych takich jak: Wydział Inżynierii Materiałowej PW, Wydział Mechatroniki PW, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Centralne Laboratorium Kryminalistyki Policji, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, Instytut Energetyki oraz przedstawicieli przemysłu tj.: EC Systems, Alstom Power – Switzerland, Energodiagnostyka, Korporacja Wschód, Zespół Elektrowni PAK.

Pierwszy, zakończony już projekt (rozliczony merytorycznie i finansowo), realizowany był w ramach Programu Badań Stosowanych i zatytułowany był: „Wykrywanie wczesnych faz uszkodzeń stalowych elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy zjawisk magnetomechanicznych w ziemskim polu magnetycznym” - PBS1/B4/6/2012. Dotyczył diagnozowania wczesnej fazy uszkodzeń zmęczeniowych i doraźnych, materiałów wykorzystywanych w przemyśle energetycznym. Projekt zakończył się włączeniem opracowanej kompleksowej metody magnetycznej do eksploatacji obiektów technicznych związanych z przemysłem energetycznych, do oferty firmy EC Systems (**P12**). Nowa oferta badawcza bazuje na opracowanych w ramach projektu elementach takich jak:

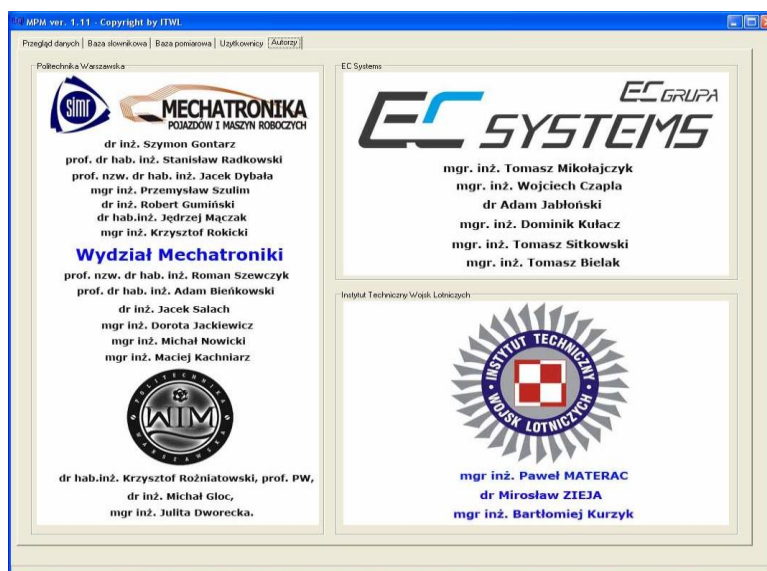
- urządzenie pomiarowe MDUES-1, które zbudowane jest z dwóch głównych modułów: moduł nadrzędny z zasilaniem, mikrokontrolerem, pamięcią, akcelerometrem i interfejsem użytkownika oraz z modułu pomiarowego złożonego z 13 magnetometrów rozmieszczonych w dwóch płaszczyznach;

- aplikacji pozwalającej na zbieranie danych pomiarowych z sieci trójosiowych czujników urządzenia MDUES-1 (ważną rolą aplikacji jest także specjalnie opracowany interfejs graficzny, pozwalający na przejrzyste wizualizowanie wszystkich najważniejszych parametrów pola magnetycznego przydatnych przy inspekcji in situ badanego obiektu);

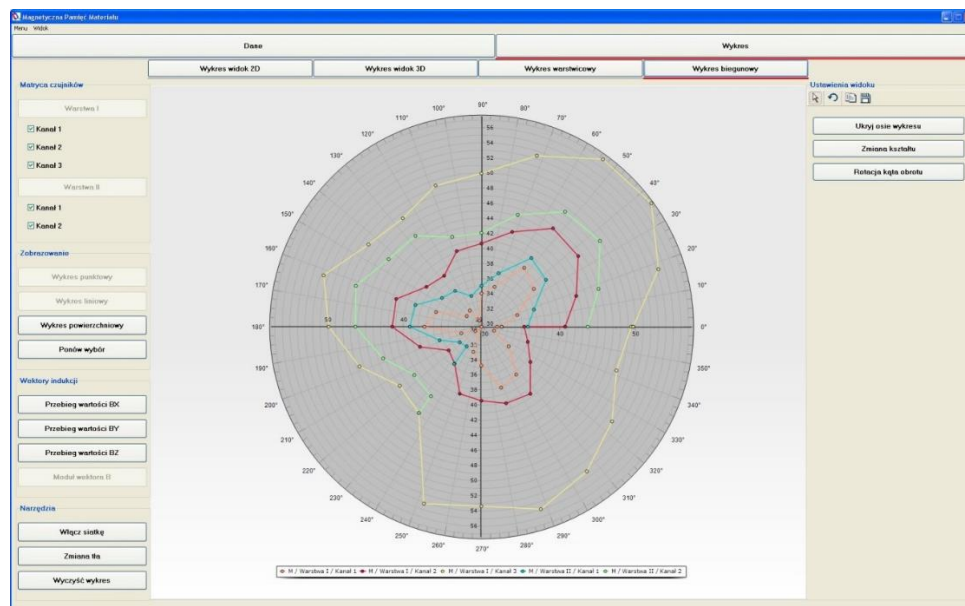
- systemu doradczo eksperckiego opierającego się na bazie danych zawierających unikalne wyniki badań (m.in. charakterystyk magnetycznych i magnetomechanicznych), które mogą być uzupełniane o kolejne materiały i w ten sposób, system może rozszerzać swoje możliwości wraz z czasem jego funkcjonowania;

- systemu będącego internetową bazą wyników pomiarów oraz publikacji z nimi związanych. System zakłada możliwość udostępniania plików pomiarowych zawierających wyniki eksperymentów badawczych, jak również zapewnia możliwość upowszechniania opracowań naukowych z nimi związanych, zainteresowanym badaczom z całego świata. System ma postać rozbudowanego serwisu WWW, udostępniającego zarówno ogólnodostępne informacje na temat badań prowadzonych w ramach prowadzonego projektu PBS, jak też informacje szczegółowe związane z poszczególnymi przeprowadzonymi eksperymentami. Informacje o przeprowadzonych pomiarach są gromadzone w opracowanej relacyjnej bazie danych pomiarowych. Baza ta stanowi zarazem repozytorium przypadków w rozumieniu techniki Case-Based Reasoning. System nie traci swej funkcjonalności ani wartości merytorycznej po zakończeniu projektu PBS i będzie nadal uzupełniany i wykorzystywany w dalszych pracach naukowych i kształceniu studentów.

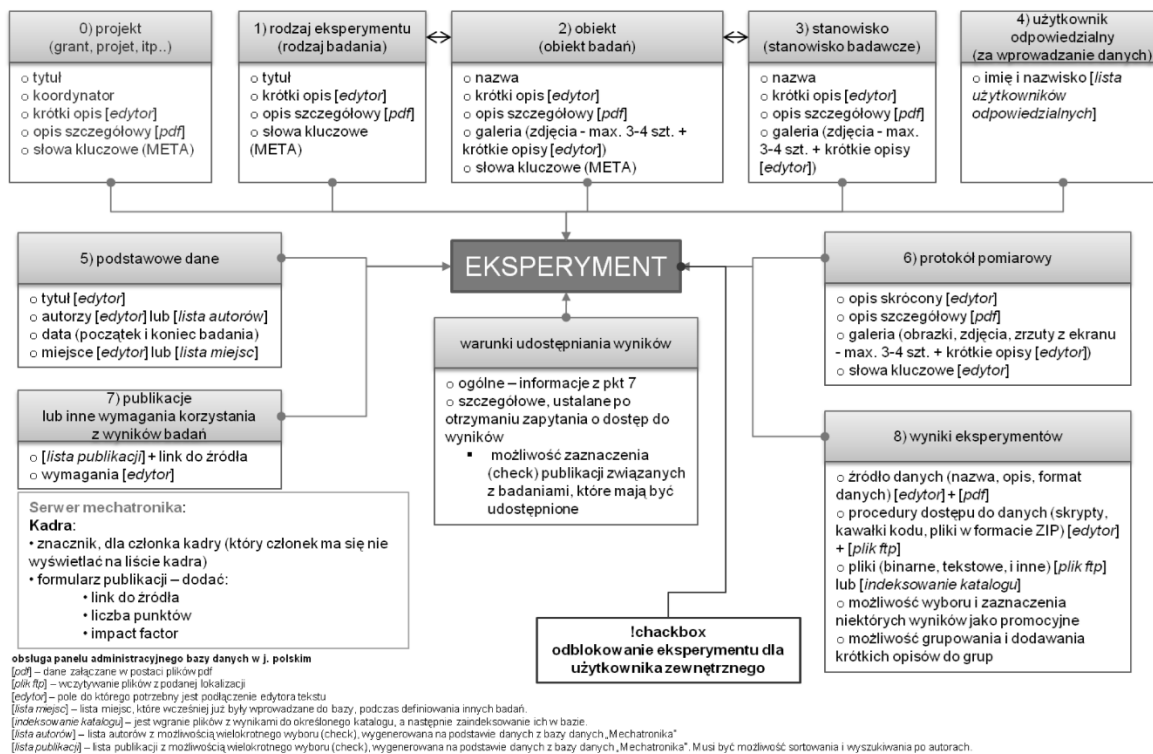
Poniżej zamieszczam ilustracje: Rys.8: Ekran informacyjny opracowanego programu współpracującego z bazą danych oraz Rys.9: Okno program współpracującego z dedykowanym mobilnym urządzeniem MDUES-1. Rys.10: Struktura systemu będącego internetową bazą wyników pomiarów.



Rysunek 8. Ekran informacyjny opracowanego programu współpracującego z bazą danych.



Rysunek 9. Okno program współpracujące z dedykowanym mobilnym urządzeniem MDUES-1.



Rysunek 10. Struktura systemu będącego internetową bazą wyników pomiarów.

Drugi projekt jest odpowiedzią na zapotrzebowanie następujących instytucji: MON, MSW (Straż Graniczna, Policja), Ministerstwo Finansów (Służby celne), Ministerstwo Transportu, ABW. Jest finansowany przez NCBiR ze środków na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa i nosi tytuł: „Pasywne i aktywne metody magnetyczne jako podstawa nowej metodyki badań związanych z wykrywaniem, zwalczaniem i neutralizacją zagrożeń terrorystycznych oraz przestępczości zorganizowanej” - DOB-BIO6/16/44/2014. Tematyka projektu jest priorytetowym obszarem badawczym państwa i dotyczy: nowoczesnych technologii i innowacyjnych rozwiązań w zakresie wykrywania, zwalczania i neutralizacji zagrożeń. Celem projektu jest wykonanie dokumentacji

technicznej dotyczącej nowo opracowanej metodyki badań nieniszczących: określanie stanu naprężeń i wyężenia materiału, wykrywanie defektów mechanicznych, tj. mikropęknięcia, uplastycznienia itp., identyfikacja degradacji struktury materiału z określeniem jej naturalnej lub zamierzonej destrukcji, odtworzenie cech/znaków oryginalnej struktury materiału, wykonanie prototypu oraz stworzenie baz danych zawierających magneto-optyczne obrazy pól numerycznych pojazdów, maszyn roboczych oraz broni. Realizacja projektu przebiega pomyślnie, a efektem końcowym będzie metodyka nieniszczących badań oraz prototyp urządzenia.

Podsumowując moje osiągnięcia, zawierają one propozycje rozwiązania w pełni oryginalnego zadania naukowego wykazującego istotne aspekty użyteczne. Badania symulacyjne zostały potwierdzone i zweryfikowane obszernym materiałem doświadczalnym, pokazującym wysoką efektywność zaproponowanych metod i metodologii, o szerokim spektrum zastosowań. Przedstawiony oryginalny opis efektów krzyżowych stwarza szansę nie tylko dalszego rozwoju zaproponowanych metod diagnostyki konstrukcji i maszyn, ale również dotarcie do nowych zjawisk i zależności niosących informacje diagnostyczne. Można w związku z tym wyrazić przekonanie, że poruszone w pracy kwestie badawcze i zaprezentowane oryginalne koncepcje rozwiązań spotkają się z dużym zainteresowaniem osób zajmujących się problematyką, szeroko pojmowaną eksploatacją obiektów technicznych.

Bardzo obiecujący i atrakcyjny potencjał pasywnych metod diagnostycznych otworzył się dzięki rozwojowi technologii materiałowych, technologii sensorycznych i informatycznych. Został on już dostrzeżony przez największe ośrodki i instytuty naukowe w Europie jak i na świecie. Celowe więc jest, nie tylko uczestniczenie w wyścigu po innowacyjne technologie, ale przede wszystkim merytoryczny wkład w rozwój technicznego dorobku narodowego, który będzie służył społeczeństwu polskiemu, jak też będzie umacniał pozycję polskiej myśli technicznej w świecie.

Osiągnięte wyniki badań o dużym potencjale publikacyjnym w najlepszych żurnalach, innowacyjne rezultaty wymagające ochrony patentowej, zainteresowanie rezultatami prowadzonych przeze mnie prac z różnych gałęzi przemysłu, wygrywane z pierwszych miejsc rankingowych konkursy na finansowanie badań, również konkursy związane z przyjętą polityką naukową i naukowo-techniczną państwa, jednoznacznie wskazują, że tematyka badań i prac rozwojowych jest właściwa i powinna być kontynuowana, a nawet intensyfikowana. Z tego punktu widzenia celowe jest budowanie zespołów badawczych zajmujących się rozwijaną przeze mnie tematyką.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.

Poza obszarem głównego osiągnięcia, w swojej praktyce naukowej zajmuję się pracami obejmującymi następującą tematykę: 5.1. Badanie i modelowanie wpływu technologii obróbki stali na jej właściwości magnetyczne, 5.2. Wykorzystanie metod magnetycznych w systemach par ultranadkrytycznych oraz układach kogeneracyjnych, 5.3. Metody wibroakustyczne w diagnostyce maszyn. 5.4. Badania w warunkach polarnych.

5.1. Badanie i modelowanie wpływu technologii obróbki stali na jej właściwości magnetyczne.

W obszarze moich działań badawczych znalazły się także zagadnienia modelowania zjawisk magnetycznych w ujęciu Metody Elementów Skończonych. Procesy zachodzące w maszynach elektrycznych i elementach elektromagnetycznych (np.: przewodnikach) są nieliniowe i uwarunkowane wzajemnym oddziaływaniem pola elektromagnetycznego, zjawisk mechanicznych, a także zjawisk cieplnych. W dostępnej literaturze brakuje kompleksowych modeli MES uwzględniających zarówno równania konstytutywne opisujące zjawiska elektromagnetyczne (np.: strumień magnetyczny, wzbudzany poprzez połączenia czołowe uzwojeń, przenikalność magnetyczna, histereza magnetyczna, zjawisko prądów wirowych, anizotropia magnetyczna blach elektrotechnicznych) jak i mechaniczne (np.: naprężenia, deformacje kształtu, zmęczenie, historia materiału). Prowadzone przeze mnie badania dotyczyły m. in. modelowania zjawisk magnetycznych i mechanicznych zachodzących w wybranych urządzeniach (np.: skaner magnetyczny [3]), modelowania i badań eksperymentalnych procesów technologicznych wytwarzania materiałów elektrotechnicznych (np.: cięcie mechaniczne [5]) oraz badań wytrzymałościowych konstrukcji. Badanie procesu cięcia materiałów elektrotechnicznych ze względu na występujące w procesie nieliniowości (np.: geometryczna, fizyczna) jest zagadnieniem nowym i bardzo złożonym. W ramach prowadzonych prac analizowano wpływ parametrów technologicznych procesu na jakość wyrobu finalnego oraz na jego właściwości magnetyczne. W efekcie podjętej współpracy z pracownikami Politechniki Koszalińskiej (prof. dr hab. inż. Leonem Kukiełką oraz dr inż. Łukaszem Bohdalem), brałem udział w opracowaniu aplikacji komputerowych umożliwiających analizę zjawisk fizycznych i magnetycznych zachodzących podczas procesu cięcia blach elektrotechnicznych z wykorzystaniem MES [4]. Wyniki badań przedstawiono na konferencjach krajowych (DIAG [2, 3]) i międzynarodowych (Mikulasz [1]), oraz w formie rozdziału w monografii [4]. Proces cięcia został zamodelowany w ujęciu przyrostowym, co umożliwiło zwiększenie efektywności analiz i skrócenie czasu obliczeń. Opracowane przyrostowe modele matematyczne ruchu i deformacji obiektu oraz algorytmy numeryczne ich rozwiązania pozwalają na kompleksową analizę zjawisk zachodzących podczas procesu cięcia. W efekcie możliwe jest prognozowanie jakości technologicznej wyrobu, ograniczenie zużycia energii oraz odpadów po cięciu.

Prowadziłem także badania eksperymentalne polegające na monitorowaniu procesu cięcia blach elektrotechnicznych z zastosowaniem zaawansowanego systemu wizyjnego. W wyniku badań możliwe było analizowanie zjawisk fizycznych zachodzących w różnych fazach procesu np.: kinematyki płynięcia materiału, śledzenie obszarów przylegania i poślizgu, dekohezji. System wizyjny umożliwił kompleksową analizę przyczyn powstawania wad wyrobów (np.: zadziórów na

powierzchni przecięcia). Dzięki temu opracowano wytyczne do projektowania procesu, doboru narzędzi i parametrów obróbkowych w aspekcie jakości wyrobu finalnego i redukcji odpadu [1].

Brałem także udział w analizie zjawisk fizycznych zachodzących podczas cięcia stopów aluminium [5]. Wyniki prac badawczych umożliwiły mi nawiązanie współpracy z firmami na terenie całego kraju, na zlecenie których zostały wykonane opracowania, między innymi, w zakresie: badań wpływu parametrów procesu cięcia na stany naprężeń, odkształceń, przemieszczeń oraz jakość powierzchni przecięcia stali konstrukcyjnych, analizy wpływu parametrów procesu cięcia na stany naprężeń, odkształceń oraz jakość uzyskanej powierzchni przecięcia stali ET 122-30, opracowania wytycznych do projektowania platform przemysłowych [6-8]. Wyniki badań zostały wdrożone i wykorzystane przez firmy do zwiększenia jakości swoich wyrobów i obniżenia nakładów energetycznych.

W części opisanego obszaru dotyczącego prac nad badaniem stali elektrotechnicznych współpracuję z Panią mgr Dorotą Jackiewicz, której jestem opiekunem pomocniczym jej pracy doktorskiej.

Poniżej podano przykładowe publikacje dotyczące prac badawczych habilitanta z omówionego zakresu.

[1] Łukasz Bohdal, **Szymon Gontarz**, Dorota Jackiewicz, Radosław Patyk, Tytuł referatu: *“The influence of mechanical cutting technology on quality of cut surface and magnetic properties of grain oriented silicon steels”*. XV International Technical Systems Degradation Conference. Liptovsky Mikulasz (Słowacja), 30 marca – 2 kwietnia 2016.

[2] Marcin Jasionowski, **Szymon Gontarz**, Łukasz Bohdal, Dorota Jackiewicz, Tytuł referatu: *„Badania magnetyczne w identyfikacji wpływu procesów technologicznych obróbki stali”*. IX Krajowa Konferencja Naukowa Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów (DIAG). Ustroń, 22 – 25 września 2015.

[3] **Szymon Gontarz**, Łukasz Kurkus, Michał Trojgo, Damian Walczak, Łukasz Zieliński: *„Projekt i budowa współrzędnościowej maszyny do pasywnych pomiarów magnetycznych”*, IX Krajowa Konferencja Naukowa Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów (DIAG). Ustroń, 22 – 25 września 2015

[4] Bohdal Ł., **Gontarz Sz.**, Kukielka L., Radkowski S.: Modeling of Residual Stresses Induced in Shear Slitting Of Grain Oriented Silicon Steel Using SPH Method. Inteligentne Technologie w Kształtowaniu Powierzchni – Monografia. Gorzów Wlkp. – Poznań, 2015. ISBN 978-83-64249-34-1, str. 13-25

[5] Bohdal Ł., Kukielka L., **Gontarz Sz.**, Gotowała K.: Modelowanie procesu wykrawania elementów pojazdów samochodowych za pomocą metody cząstek hydrodynamicznych. Autobusy nr. 6/2015. Str. 37-40.

[6] Analiza wytrzymałościowa stalowych konstrukcji przemysłowych (GIPO Sp. z o.o. Koszalin; 2016r.). Np.: Radosław Patyk, inż. Łukasz Bohdal, Szymon Gontarz, Koszalin maj 2016 r.:

- Raport z analiz platformy ITMP5.
- Raport z analiz platformy ITMP8.
- Raport z analiz platformy ITP33.

[7] Współpraca z firmą PRO - Service Sp. z o.o. w Świdwinie związana z projektowaniem narzędzi do cięcia materiałów trudnoobrabialnych, współpraca w latach 2010 - 2016. Np.: Łukasz Bohdal, Jarosław Chodór, Szymon Gontarz, Paweł Kałduński, Świdwin maj 2016 r.:

- Raport z obliczeń numerycznych procesu cięcia stali konstrukcyjnej 1018 na gilotynie.
- Raport z analizy wpływu parametrów procesu cięcia na stany naprężeń, odkształceń oraz jakość uzyskanej powierzchni przecięcia stali ET 122-30.

[8] Współpraca naukowo-badawcza z firmą GIPO Sp. z o.o. Koszalin, związana z wdrażaniem nowych technologii w produkcji wyrobów w branży metalowej (2016r.).

5.2. Wykorzystanie metod magnetycznych w systemach par ultra-nadkrytycznych oraz układach kogeneracyjnych.

Biorąc pod uwagę zmiany zachodzące na rynku energii, wynikające z polityki klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej dotyczące wzrostu wymagań odnośnie ochrony środowiska naturalnego, poprawienia bezpieczeństwa energetycznego kraju oraz ciągłości dostaw energii do odbiorców końcowych w elektrowniach zawodowych, występuje coraz większe zapotrzebowanie na systemy monitorowania, które mogą opierać się na metodach magnetycznych. Biorąc pod uwagę nowopowstające obiekty m.in.: Turów, Opole, Jaworzno, Koźlenice oraz wykorzystywane materiały na budowę kotłów (stale ferrytyczne oraz stopy niklu) przyszłościowe zastosowanie metody magnetycznych jest również uzasadnione. Obecnie tendencje rozwojowe skupiają się na wykorzystywaniu stopów niklu (Inconeli). Wpływa to bezpośrednio na wzrost parametrów termodynamicznych pracy obiektu i na poprawę jego sprawności przy jednoczesnym zmniejszeniu emisji związków toksycznych do otoczenia. Wysoka zawartość niklu (ponad 44% w stopie) podwyższa właściwości termiczne, temperaturę graniczną i ciśnienie graniczne pracy obiektu m.in.: bloku energetycznego, łopatki turbiny gazowo-parowej. Taki stop może pracować w temperaturze przekraczającej 700°C, przy ciśnieniu powyżej 350 barów. Jest to przykład materiału, który znalazł zastosowanie w technologiach ultra-nadkrytycznych (ang. UCS – Ultra Critical Steam). Poprzez ich zastosowanie jako materiały bloków, kotłów w elektrowniach zawodowych uzyskuje się najwyższe sprawności wytwarzania energii elektrycznej - nawet do 55%.

Rozwój technik diagnostyki metodami magnetycznymi jest zbieżny również ze zrównoważonym rozwojem Polski, polityką energetyczną Polski jak też z rozwojem filozofii Smart Grid na terytorium Polski. Niedozownym elementem zrównoważonego rozwoju Polski są urządzenia generacji rozproszonej, które tylko wytwarzają energię elektryczną (do tej grupy zaliczane są Odnawialne Źródła Energii) bądź w jednym procesie technologicznym wytwarzają energię elektryczną i ciepło (urządzenia kogeneracyjne). Do technologii kogeneracyjnych zaprezentowanych w dyrektywie 2012/27/UE zaliczono m.in.: silniki spalinowe, silniki parowe, ogniwa paliwowe, mikro-turbiny, organiczny obieg Rankine'a oraz silniki Stirlinga [1-3]. Istnieje bardzo duży potencjał wykorzystania metod magnetycznych do diagnozowania stanu pracy wyżej wymienionych urządzeń,

m.in.: wymienniki ciepła w silnikach Stirlinga - gdzie poprzez zmianę pola magnetycznego istnieje możliwość wczesnego wykrycia zużycia bądź zapiecenia wkładu regeneratora, zatkania kanałów w rurkach nagrzewnicy. Opisywanym procesom towarzyszy zmiana naprężeń, a te z kolei po transformacji do domeny magnetycznej są użyteczne przy wczesnym rozpoznawaniu nieprawidłowości pracy urządzenia [2], predykcji wystąpienia awarii (ograniczenie postojów) co w konsekwencji bezpośrednio przekłada się na korzyści finansowe przedsiębiorstwa, które je eksploatuje [1, 3].

Rozwój metod magnetycznych, monitorowania magnetycznego zdeterminowany jest również przez postęp technologiczny na rynku magazynów energii elektrycznej, a w szczególności elektrochemicznych magazynów energii [4, 5] przy stacjonarnym (energetyka zawodowa, energetyka rozproszona - prosumencka) oraz mobilnym (pojazdy elektryczne EV ang. Electric Vehicle i hybrydowe P-HEV and. Plug In Hybrid) wykorzystaniu. Akumulatory elektrochemiczne to wtórne źródła mocy, które cechuje praca odwracalna - proces ładowania/rozładowania. Podczas ładowania/rozładowania akumulatora zachodzą zjawiska fizyczne, które mogą zostać przetransformowane do domeny magnetycznej i będą użyteczne przy monitorowaniu pracy akumulatora, m.in.: zmiana stopnia naładowania, stopień żywotności (ang. State of Health), zakresy pracy nieliniowej, zmiana pojemności użytecznej a także temperatura cel, ilość ciepła wydzielonego podczas pracy akumulatora. W celu opracowania i implementacji metod monitorowania magnetycznego niezwykle istotne jest podejście wielodomenowe (domena termodynamiczna - domena elektrochemiczna - domena magnetyczna) wykorzystujące sprzężone równania: Peukerta - opisujące zmianę pojemności użytecznej [5], Butlera-Volmera dotyczącego aktywacji materiału czynnego elektrod, równania zachowania energii dla baterii, równania wielowymiarowej wymiany ciepła, a także równania Maxwella wiążące pole magnetyczne z polem elektrycznym. Na podstawie związania domeny elektrochemicznej z domeną termodynamiczną (czynnikiem łączącym obie domeny będzie zmiana entropii w układzie) oszacowane może zostać ilościowe i jakościowe wydzielenie ciepła, które powstaje w wyniku pracy ogniwa i jest zaliczane do strat. Ciepło wydzielane podczas pracy baterii wymaga połączenia domeny elektrochemicznej z domeną termodynamiczną i jest sumą ciepła wydzielanego podczas polaryzacji aktywacyjnej, ciepła wydzielanego podczas spadku napięcia na oporze wewnętrznym oraz ciepła wydzielanego podczas polaryzacji stężeniowej. Strumień ciepła wydzielanego jest bezpośrednio związany ze zmianą entropii i jest wprost proporcjonalny do tej zmiany [4].

Na podstawie związania domeny elektrochemicznej z domeną elektro-magnetyczną (czynnikiem łączącym jest zmiana strumienia magnetycznego, w szczególności uogólnione prawa Ampera, Gaussa i Faradaya) możliwe jest pośrednie monitorowanie parametrów kluczowych we wszystkich obszarach pracy akumulatora.

Poprzez wykorzystanie metod iteracyjno-aproksymacyjnych [5] możliwe jest opracowanie innowacyjnych systemów monitorowania magnetycznego, które wychodzą naprzeciw oczekiwaniom odbiorców jak również postępowi technologicznemu.

Poniżej podano przykładowe publikacje dotyczące prac badawczych habilitanta z omówionego zakresu.

[1] Chmielewski A., **Gontarz Sz.**, Gumiński R., Mączak J., Szulim P. Research Study of the Micro Cogeneration System with Automatic Loading Unit, Proceedings of AUTOMATION-2016, March 2-4, 2016, Warsaw, Poland, Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques Vol. 440, Advances in Intelligent Systems and Computing, pp 375-386, 2016 {DOI: 10.1007/978-3-319-29357-8_34} [ISI Web of Science]

[2] Chmielewski A., **Gontarz Sz.**, Gumiński R., Mączak J., Szulim P. Research on a Micro Cogeneration System with an Automatic Load-Appling Entity, Challenges in Automation, Robotics and Measurement Techniques Vol. 440, Advances in Intelligent Systems and Computing, pp. 387-395, 2016 {DOI: 10.1007/978-3-319-29357-8_35} [ISI Web of Science]

[3] Chmielewski A., **Gontarz Sz.**, Gumiński R., Mączak J., Szulim P. Analiza wpływu parametrów eksploatacyjnych na drgania układu mikro kogeneracyjnego, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 1, pp. 45-53, 2016 {DOI:10.15199/48.2016.01.11} [ISI Web of Science]

[4] Chmielewski A., **Gontarz Sz.**, Gumiński R., Mączak J., Szulim P. Badania elektrochemicznych magazynów energii, Przegląd Elektrotechniczny, No. 10, pp. 231-234, 2016.

[5] Chmielewski A., **Gontarz Sz.**, Szulim P. Modelowo - wsparte badania elektrochemicznych magazynów energii, Rynek Energii Nr 7,37-46, 2016.

5.3. Metody wibroakustyczne w diagnostyce maszyn.

Diagnostyka wibroakustyczna, ten obszar naukowo-badawczy rozwijam od pracy magisterskiej włącznie, poprzez doktorat jak również obecnie. Uczestniczę w badaniach rozwijając tę dziedzinę jak i korzystam ze zdobytego doświadczenia, które umożliwia mi choćby weryfikację rozwijanych nowych metod magnetycznych w diagnostyce technicznej. Do tej pory zajmowałem się i mam osiągnięcia w analizie sygnałów niestacjonarnych, separacji sygnałów użytecznych metodami ślepych [1], klasyfikacją symptomów diagnostycznych w diagnozowaniu i prognozowaniu, gdzie obiektami były pojazdy oraz różnego rodzaju maszyny wirujące. Najnowsze prace z tej dziedziny to dwa wynalazki, które są chronione patentami oraz publikacja napisana we współpracy z naukowcami chińskimi z State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering z Xi'an Jiaotong University.

Pierwszy patent [2] powstał z badań przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej. Przedstawia unikalną autorską koncepcję wykorzystania histerezy jako narzędzia będącego podstawą modelu opisującego sygnał wibroakustyczny poruszającego się obiektu, rejestrowany przez stacjonarne stanowisko pomiarowe. Przedmiotem wynalazku jest sposób diagnozowania nieprawidłowości w pracy układów mechanicznych poruszających się obiektów, bazujący na wykorzystaniu histerezy sygnału wibroakustycznego wywołanej efektem zjawiska Dopplera. Sposób polega na identyfikacji zjawiska dudnienia i analizie częstotliwości modulacji amplitudowej sygnału

wibroakustycznego dla parametrów eksperymentu odpowiadających pojawieniu się histerezy dopplerowskiej. Zaobserwowanie pętli histerezy było kluczowe w kwestii rozszerzenia możliwości diagnostyki i wykorzystania efektu zjawiska Dopplera. Zdefiniowane kryteria wykonania eksperymentu diagnostycznego, dla których istnieje możliwość obserwacji pętli wraz z właściwym przetwarzaniem sygnałów, umożliwiło dotarcie do informacji diagnostycznej o poruszających się obiektach, która do tej pory była niedostępna. Drugi patent [3] dotyczy diagnozowanie przekładni. Przedmiotem wynalazku jest sposób wykrywania inicjacji zmęczeniowego pęknięcia zęba przekładni zębatej, polegający na kontroli zmian struktury widma drgań obudowy przekładni (elementu nieruchomego). Analiza odbywa się w pasmach wokół kolejnych harmonicznym, odpowiadających wielokrotnościom częstotliwości zazębienia. Generowane są składowe empiryczne sygnału, a następnie porównywane są względne zmiany pierwszej i drugiej harmonicznej pierwszej składowej empirycznej. Kolejna praca [4] to międzynarodowa publikacja dotycząca estymacji pozostałego czasu użytkowania dotyczy zarówno łożysk tocznych jak i przekładni planetarnych. Zaprezentowana metoda bazuje na modelu zaproponowanym przez zespół z Chin i składa się ze specjalnie skonstruowanego wskaźnika oraz części odpowiedzialnej za przewidywanie. Wskaźnik opiera się na minimalizacji minimalnego ważonego błędu kwantyzacji, który działa na bazie wielu parametrów związanych ze stanem technicznym obiektu. Natomiast moduł predykcyjny korzysta z tak zwanego „particle filtering-based algorithm”. Rola polskiej strony polegała na przeprowadzeniu eksperymentu na stanowisku mocy krążącej i przetestowaniu opisanych metod. Współpraca zaowocowała uwagami i poprawkami, które zostały naniesione w pracy.

Poniżej podano przykładowe publikacje dotyczące prac badawczych habilitanta z omówionego zakresu.

[1] **Gontarz Sz.**, Tse P., Wang X. (2007): Enhanced eigenvector algorithm for recovering multiple sources of vibration signals in machine fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 21 (2007) 2794-2813

[2] Patent nr: PL401814-A1 (numer akcesji: DIIDW: 2014N17762) pt.: „*Sposób diagnozowania nieprawidłowości w pracy układów mechanicznych poruszających się obiektów*”, **Szymon Gontarz**, Stanisław Radkowski, Krzysztof Szczurowski, Jacek Dybała, Adam Gałęzia, Przemysław Szulim, Krzysztof Rokicki

[3] Patent nr: PL401455, pt.: „*Sposób wykrywania inicjacji zmęczeniowego pęknięcia zęba w przekładni zębatej*”, Gumiński R., Radkowski S., Wodecki P., Mączak J., Jasiński M., **Gontarz Sz.**, Gałęzia A., Szulim P., Mydłowski T., Lubikowski K..

[4] Yaguo Lei, Naipeng Li, **Szymon Gontarz**, Jing Lin, Stanisław Radkowski, Jacek Dybała, A Model-Based Method for Remaining Useful Life Prediction of Machinery, *IEEE Transactions on Reliability*, Volume: 65, Issue: 3, Sept. 2016, pp 1314 - 1326

5.4. Badania w warunkach polarnych.

Na uwagę zasługuje wyróżnienie przyznane przez Kapitułę 16 edycji ogólnopolskich spotkań podróżników, żeglarzy i alpinistów Kolosy 2013 – najważniejszej polskiej imprezy promującej najpoważniejsze osiągnięcia Polaków w tych dziedzinach. Między innymi dzięki imponującemu dorobkowi w dziedzinie polarnictwa (dwa wyróżnienia za Wyczyn Roku za działalność na lądolodach Grenlandii oraz Islandii) trzysobowemu zespołowi w składzie: Szymon Gontarz, Grzegorz Gontarz, Piotr Zaśko, przyznano nagrodę im. Andrzeja Zawady na realizację projektu wyprawy, której celem jest dokonanie pierwszego polskiego trawersu Antarktydy. Podczas wyprawy, ze wsparciem zespołu mam zamiar przeprowadzić unikalne badania zjawisk magnetomechanicznych w specyficznych warunkach wewnątrz kontynentu antarktycznego. Powodzenie wyprawy jest m.in. uzależnione od bilansu energetycznego, na który największy wpływ ma ciężar ciągnącego ładunku przypadającego na osobę. To wymusza stosowanie najnowszych technologii materiałowych w tym użycia materiałów kompozytowych. Bezdyskusyjnie nasze pulki muszą być wykonane w tej technologii. Dodatkowo są one elementem krytycznym, który w rzeczywistych warunkach poddawany jest bardzo trudnym warunkom obciążeniowym (długotrwałe obciążenia zginające, skręcające, udarowe). Planuje się przekształcenie materiału konstrukcyjnego pulki w materiał inteligentny (ang. smart materials) w postaci czujników/przetworników/struktur zintegrowanych z konstrukcjami wykonanymi z materiałów kompozytowych. Idea polega na zmodyfikowaniu standardowego kompozytu o pewną strukturę złożoną z włókien/taśm amorficznych. Materiał tego typu ma wybitne właściwości magnetyczne i może być stosowany również do budowy czujników odkształceń/siły. Wynika z tego, że jest dobrym nośnikiem zjawisk magnetomechanicznych, więc odpowiednie jego wykorzystanie daje szansę diagnozowania docelowych kompozytów. Trawers Antarktydy z tak zaprojektowanymi pulkami dostarczyłby wielu cennych danych pomiarowych nie tylko ze względu na ekstremalne warunki środowiskowe oraz obciążeniowe podczas przemieszczania, ale przede wszystkim ze względu na sam obiekt, sterylne magnetycznie warunki naturalnego pola magnetycznego Ziemi jak i specyficzną proporcję składowych wektora natężenia pola magnetycznego, której zdecydowanie dominujący jest kierunek pionowy. W celu realizacji przedsięwzięcia nawiązano współpracę z Panią Dr Anną Kidawą z Instytutu Biochemii i Biofizyki Pan z Zakładu Biologii Antarktyki oraz firmą Selma Expeditions Sp. z o.o. dysponującą odpowiednim jachtem oraz załogą doświadczoną w polarnych rejsach. Wymienione osoby i organizacje są również zainteresowane przeprowadzeniem badań naukowych.

6. Podsumowanie dorobku naukowego.

Dorobek naukowy habilitanta obejmuje łącznie 69 prac, z czego 37 po uzyskaniu stopnia doktora. 12 artykułów opublikowano w czasopiśmie, które znajdują się lub znajdowały na liście Journal Citation Reports (JCR), dla których sumaryczny Impact Factor, zgodny z rokiem opublikowania, wyniósł 10,082.

Ponadto habilitant brał udział w realizacji łącznie 13 projektów badawczych i badawczo-rozwojowych (bez uwzględniania prac statutowych), z czego w 2 projektach pełnił lub pełni funkcje kierownicze. Habilitant aktywnie uczestniczył i wciąż uczestniczy w procesie recenzowania

publikacji w czasopismach z listy JCR, takich jak: IEEE: Transactions on Magnetics, Sensors Journal; Elsevier - Mechanical Systems and Signal Processing; Polish Academy of Sciences: Metrology and Measurement Systems, oraz spoza listy JCR: Wydawnictwo PAK - Measurement Automation Monitoring, PTDT – Diagnostyka, Agenda wydawnicza SIMP – Mechanik, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej.

Za działalność naukową habilitant był trzykrotnie wyróżniony nagrodami Rektora Politechniki Warszawskiej, otrzymywał stypendia, jest również laureatem konkursu „Innowator Mazowska” gdzie zajął I miejsce w kategorii „Innowacyjny Młody Naukowiec”, natomiast w ogólnopolskim konkursie o stypendium dla wybitnych młodych naukowców MNiSW w roku 2015, w ocenie ministerialnej otrzymał 85 punktów na 100 możliwych.

Tabela.4. Zestawienie dorobku naukowego.

Rodzaj publikacji	Przed doktoratem	Po doktoracie	Razem
monografie		1 (praca doktorska)	1
Rozdziały w monografiach	1	5	6
Publikacje w czasopismach, które posiadają/-ły współczynnik IF	1	11	12
Publikacje w czasopismach recenzowanych z listy B MNiSW	9	4	13
Publikacje w materiałach konferencyjnych międzynarodowych	13	13	26
Publikacje w materiałach konferencyjnych krajowych	7	4	11
Razem:			Ogółem: 69

Tabela. 5. Zestawienie statystyki bibliometrycznej

Baza danych (dane z dnia 17 października 2016 roku)	Liczba cytowań	Liczba cytowani (bez autocytowań)	h-index
Web of Science	36	25	4
Scopus	51	30	4
Google Scholar	100 (od roku 2011: 89)	brak danych	5

Szymon Gontarz

