

Wrocław, 29.09.2023 r.

Dr inż. Paweł Ewert

Politechnika Wrocławska

Wydział Elektryczny

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Załącznik nr 3

do wniosku z dnia 29.09.2023 r.

o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

w dziedzinie Nauk Inżynieryjno-Technicznych

w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Autoreferat

Autoreferat

1 Imię i nazwisko.

Paweł Ewert

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

- **Stopień doktora nauk technicznych** w dyscyplinie Elektrotechnika, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, tytuł rozprawy: „*Diagnostyka mechanicznych uszkodzeń napędów z silnikami indukcyjnymi przy wykorzystaniu sieci neuronowych*”, rok 2012, promotor: prof. dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, recenzenci: prof. dr hab. inż. Leon Swędrowski, dr hab. inż. Ludwik Antal, rozprawa doktorska z wyróżnieniem (Załącznik nr 2).
- **Dyplom ukończenia jednolitych studiów magisterskich**, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, kierunek Elektrotechnika, specjalność Inżynieria Elektryczna, tytuł pracy: „*Zastosowanie harmonicznych żłobkowych do monitorowania i diagnostyki silników indukcyjnych*”, rok 2007, promotor: prof. dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, praca z wyróżnieniem.

3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

- 01.10.2014–do chwili obecnej – zatrudnienie na stanowisku adiunkta naukowo dydaktycznego w Katedrze Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej.
- 01.01.2013–30.09.2014 – zatrudnienie na stanowisku adiunkta naukowo dydaktycznego w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej.
- 22.09.2011–31.12.2012 – zatrudnienie na stanowisku asystenta naukowo dydaktycznego w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej.

4 Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

Jako podstawę wszczęcia czynności w postępowaniu habilitacyjnym zgłaszam cykl powiązanych tematycznie 12 publikacji (2 autorskich oraz 10 współautorskich) zatytułowany:

„Diagnostyka mechanicznych uszkodzeń układu napędowego przy wykorzystaniu metod przetwarzania sygnałów i sieci neuronowych”

Przedstawiony do oceny powiązany tematycznie cykl publikacji **stanowi wkład do dziedziny nauk inżynierjno-technicznych, w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**. Lista publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego obejmuje 11 artykułów na liście MEiN ([H1]– [H7], [H9]–[H12]) oraz jeden spoza listy MEiN ([H8]). Kopie publikacji naukowych wchodzących w skład cyklu stanowiącego główne osiągnięcie naukowe przedstawiono w załącznikach (od Załącznik nr 5_H1 do Załącznik nr 5_H12). Oświadczenia współautorów o udziale i roli w powstaniu każdej pracy wieloautorskiej przedstawiono w Załączniku nr 6. Poniższe zestawienie artykułów jest ustawione w kolejności od najnowszej pracy do najstarszej.

- [H1] **Paweł G. Ewert (45%)**, Czesław T. Kowalski (10%), Michał Jaworski (45%), *Comparison of the effectiveness of selected vibration signal analysis methods in the rotor unbalance detection of PMSM drive system*. Electronics. 2022, vol. 11, nr 11, art. 1748, s. 1-18.

DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11111748>.

Punktacja MEiN z 2019-2023: 100. Impact Factor: 2,690 (2021).

Mój wkład w opracowanie niniejszej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji artykułu, przygotowaniu stanowiska laboratoryjnego i współudziale w wykonaniu badań. Ponadto uczestniczyłem w weryfikacji i formalnej analizie uzyskanych wyników. Odpowiadałem za przegląd, edycję i wizualizację przygotowanego draftu artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 45%.

Potwierdzenie wkładu autorów opisane jest w treści artykułu.

- [H2] Teresa Orłowska-Kowalska (25%), Marcin Wolkiewicz (10%), Przemysław Pietrzak (15%), Maciej Skowron (10%), **Paweł G. Ewert (12%)**, Grzegorz J. Tarchała (10%), Mateusz S. Krzysztofiak (10%), Czesław T. Kowalski (8%), *Fault diagnosis and fault-tolerant control of PMSM drives - state of the art and future challenges*. IEEE Access. 2022, vol. 10, s. 59979-60024.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180153>.

Punktacja MEiN z 2019-2023: 100. Impact Factor: 3,476 (2021).

W artykule byłem odpowiedzialny za przygotowanie rozdziału piątego pt. Signal analysis methods for mechanical faults detection. Ponadto współuczestniczyłem w edycji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 12%.

- [H3] **Paweł G. Ewert (45%)**, Teresa Orłowska-Kowalska (25%), Kamila A. Jankowska (30%), *Effectiveness analysis of PMSM motor rolling bearing fault detectors based on vibration analysis and shallow neural networks*. Energies. 2021, vol. 14, nr 3, art. 712, s. 1-24.

DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en14030712>.

Punktacja MEiN z 2019-2023: 140. Impact Factor: 3,252 (2021).

Mój wkład w opracowanie niniejszej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji artykułu oraz zaproponowaniu metodologii badań. Przygotowałem stanowisko laboratoryjne w tym badane łożyska, oprogramowanie pomiarowo-diagnostyczne oraz współuczestniczyłem przy wykonywaniu pomiarów. Ponadto

uczestniczyłem w weryfikacji i formalnej analizie uzyskanych wyników. Brałem udział w opracowaniu draftu artykułu oraz jego późniejszej weryfikacji i edycji. Mój udział procentowy szacuję na 45%.

Potwierdzenie wkładu autorów opisane jest w treści artykułu.

- [H4] Kamila A. Jankowska (40%), **Paweł G. Ewert (60%)**, *Effectiveness analysis of rolling bearing fault detectors based on self-organizing Kohonen neural network - a case study of PMSM drive*. Power Electronics and Drives. 2021, vol. 6, nr 1, s. 100-112.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/pead-2021-0008>.

Punktacja MEiN z 2019-2023: 20.

Mój wkład w opracowanie niniejszej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji artykułu, zaproponowaniu metodologii oraz analizie formalnej i weryfikacji uzyskanych wyników. Przygotowałem stanowisko laboratoryjne i oprogramowanie pomiarowo-diagnostyczne oraz współuczestniczyłem przy wykonywaniu pomiarów. Brałem udział w opracowaniu draftu artykułu oraz jego późniejszej weryfikacji i edycji. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

- [H5] **Paweł G. Ewert (100%)**, *The application of the bispectrum analysis to detect the rotor unbalance of the induction motor supplied by the mains and frequency converter*. Energies. 2020, vol. 13, nr 11, art. 3009, s. 1-18.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en13113009>.

Punktacja MEiN z 2019-2023: 140. Impact Factor: 3,004 (2020).

- [H6] **Paweł G. Ewert (60%)**, Czesław T. Kowalski (20%), Teresa Orłowska-Kowalska (20%), *Low-cost monitoring and diagnosis system for rolling bearing faults of the induction motor based on neural network approach*. Electronics. 2020, vol. 9, nr 9, art. 1334, s. 1-18.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/electronics9091334>.

Punktacja MEiN z 2019-2023: 100. Impact Factor: 2,397 (2020).

Mój wkład w opracowanie niniejszej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji artykułu, zaproponowaniu metodologii oraz analizie formalnej i weryfikacji uzyskanych wyników. Przygotowałem stanowisko laboratoryjne i oprogramowanie pomiarowo-diagnostyczne, wykonałem badania laboratoryjne i opracowałem wyniki. Opracowałem detektory neuronowe łożysk tocznych. Brałem udział w opracowaniu draftu artykułu oraz jego późniejszej weryfikacji i edycji. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

Potwierdzenie wkładu autorów opisane jest w treści artykułu.

- [H7] Marcin A. Skóra (40%), **Paweł G. Ewert (40%)**, Czesław T. Kowalski (20%), *Selected rolling bearing fault diagnostic methods in wheel embedded permanent magnet brushless direct current motors*. Energies. 2019, vol. 12, nr 21, art. 4212, s. 1-19.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en12214212>.

Punktacja MEiN z 2019-2023: 140. Impact Factor: 2,702 (2019).

Mój wkład w opracowanie niniejszej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji artykułu, metodologii oraz analizie formalnej i weryfikacji uzyskanych wyników. Uczestniczyłem w opracowaniu i wykonaniu stanowiska laboratoryjnego. Przygotowałem łożyska do badań oraz oprogramowanie pomiarowo-diagnostyczne. Współuczestniczyłem w wykonaniu badań laboratoryjnych i opracowaniu wyników.

Brałem udział w opracowaniu artykułu oraz jego późniejszej poprawie. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

Potwierdzenie wkładu autorów opisane jest w treści artykułu.

- [H8] **Paweł G. Ewert (100%)**, *Application of neural networks to detect eccentricity of induction motors*. Power Electronics and Drives. 2017, vol. 2 (37), nr 2, s. 151-165.

DOI: <https://doi.org/10.5277/ped170209>.

- [H9] **Paweł G. Ewert (70%)**, Anna Dorosławska (30%), *Zastosowanie analizy falkowej do wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych (ang. Application of wavelet analysis for detection of the rolling bearing faults)*. Przegląd Elektrotechniczny. 2017, R. 93, nr 1, s. 305-310.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15199/48.2017.01.72>.

Punktacja MEiN z 2013-2018: 14.

Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na opracowaniu koncepcji artykułu i metodyki badań, przygotowaniu stanowiska laboratoryjnego, w tym przygotowaniu uszkodzonych łożysk do badań. Nadzorowałem prace nad przygotowaniem aplikacji pomiarowo-diagnostycznej i współuczestniczyłem w wykonaniu pomiarów. Ponadto uczestniczyłem w weryfikacji i formalnej analizie uzyskanych wyników. Brałem udział w opracowaniu draftu artykułu oraz jego późniejszej edycji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- [H10] **Paweł G. Ewert (70%)**, Marcin Musiał (30%), *Wykrywanie niewspółosiowości w układach napędowych z silnikiem indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości (ang. Detecting of misalignment of the drive systems with induction motor supplied by a frequency converter)*. Przegląd Elektrotechniczny. 2017, R. 93, nr 2, s. 34-38.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15199/48.2017.02.09>.

Punktacja MEiN z 2013-2018: 14.

Mój wkład w powstanie artykułu polegał na opracowaniu jego koncepcji artykułu i metodyki badań oraz przygotowaniu stanowiska laboratoryjnego. Nadzorowałem prace nad przygotowaniem aplikacji pomiarowo-diagnostycznej i współuczestniczyłem w wykonaniu pomiarów. Odpowiedzialny byłem za weryfikację i formalną analizę uzyskanych wyników. Ponadto brałem udział w opracowaniu draftu artykułu oraz jego późniejszej edycji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- [H11] **Paweł G. Ewert (50%)**, Marcin Wolkiewicz (50%), *Przegląd metod wykrywania ekscentryczności w silniku indukcyjnym z wykorzystaniem analizy prądu stojana (ang. Detection methods overview of induction motor eccentricity using stator current analysis)*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały (ang. Scientific Papers of the Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements of the Wrocław University of Technology. Studies and Research). 2015, nr 35, s. 151-160.

<https://www.ped.pwr.edu.pl/Przegląd-metod-wykrywania-ekscentryczności-w-silniku-indukcyjnym-z-wykorzystaniem,99137,0,2.html>

Punktacja MEiN z 2015: 6.

Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na współudziale w opracowaniu koncepcji artykułu i krytycznego przeglądu literatury. Przeprowadziłem badania symulacyjne przy wykorzystaniu opracowanego modelu polowo-obwodowego silnika

indukcyjnego z zamodelowaną ekscentrycznością. Współuczestniczyłem w analizie uzyskanych wyników oraz w redakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

- [H12] **Paweł G. Ewert (70%)**, Paweł Sawicki (30%), *Monitorowanie niewyważenia oraz wyważanie wirników silników indukcyjnych (ang. Monitoring of unbalance and balancing of induction motor rotors)*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały (ang. Scientific Papers of the Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements of the Wrocław University of Technology. Studies and Research). 2015, nr 35, s. 140-150.

<https://www.ped.pwr.edu.pl/Monitorowanie-niewyważenia-oraz-wyważanie-wirników-silników-indukcyjnych,99136,0,2.html>

Punktacja MEiN z 2015: 6.

Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na opracowaniu koncepcji artykułu, przygotowaniu stanowiska laboratoryjnego i współudziale w wykonaniu badań. Ponadto nadzorowałem prace nad opracowaniem aplikacji pomiarowo-diagnostycznej. Uczestniczyłem w weryfikacji i formalnej analizie uzyskanych wyników. Brałem udział w opracowaniu draftu artykułu oraz jego późniejszej edycji. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

W tab. 4.1 przedstawiłem zestawienie najistotniejszych informacji dotyczących cyklu publikacji powiązanych tematycznie, stanowiących podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego, natomiast w tab. 4.2 zestawienie publikacji wchodzących w zakres pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.

Tab. 4.1. Analiza cyklu publikacji powiązanych tematycznie pod kątem wytycznych oceny według Ministerstwa Edukacji i Nauki oraz wskaźnika Impact Factor

| Nr publikacji | Nazwa czasopisma/konferencji | Impact Factor | Punktacja wg MEiN | Wkład wnioskodawcy | Rok publikacji |
|---------------|--|---------------|-------------------|--------------------|----------------|
| [H1] | Electronics | 2,690 | 100 | 45% | 2022 |
| [H2] | IEEE Access | 3,476 | 100 | 12% | 2022 |
| [H3] | Energies | 3,252 | 140 | 45% | 2021 |
| [H4] | Power Electronics and Drives | – | 20 | 60% | 2021 |
| [H5] | Energies | 3,004 | 140 | 100% | 2020 |
| [H6] | Electronics | 2,397 | 100 | 60% | 2020 |
| [H7] | Energies | 2,702 | 140 | 40% | 2019 |
| [H8] | Power Electronics and Drives | – | – | 100% | 2017 |
| [H9] | Przegląd Elektrotechniczny | – | 14 | 70% | 2017 |
| [H10] | Przegląd Elektrotechniczny | – | 14 | 70% | 2017 |
| [H11] | Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały | – | 6 | 50% | 2015 |
| [H12] | Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały | – | 6 | 70% | 2015 |
| | Suma: | 17,521 | 780 | | |

Tab. 4.2. Analiza publikacji wchodzących w zakres pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych pod kątem wytycznych oceny według Ministerstwa Edukacji i Nauki oraz wskaźnika Impact Factor

| Nr publikacji | Nazwa czasopisma/konferencji | Impact Factor | Punktacja wg MEiN | Wkład wnioskodawcy | Rok publikacji |
|---------------|--|---------------|-------------------|--------------------|----------------|
| [D1] | Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały | – | 3 | 50% | 2013 |
| [D2] | 2017 International Symposium on Electrical Machines (SME2017) | – | 15 | 100% | 2017 |
| [D3] | Power Electronics and Drives | – | 20 | 100% | 2019 |
| [D4] | Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe | – | 7 | 50% | 2013 |
| [D5] | Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej | – | – | 30% | 2015 |
| [S1] | Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability | 2,5 | 200 | 10% | 2023 |
| | Suma: | 2,5 | 245 | | |

Współczynniki prezentujące jakościową ocenę moich publikacji naukowych

Sumaryczny współczynnik IF (Impact Factor) opracowań załączonych do cyklu publikacji powiązanych tematycznie [H1]–[H12] (zgodny z datą publikacji) wynosi **17,521**, natomiast z uwzględnieniem prac obejmujących rozszerzenie cyklu o [D1]–[D5], [S1] **20,021**.

Łączna liczba punktów publikacji wg listy MNiSW wynosi **1025**, natomiast dla prac obejmujących cykl publikacji powiązanych tematycznie **780**. Mój średni udział procentowy w przygotowaniu publikacji wchodzących w skład cyklu [H1]–[H12] wynosi **60,2%**, przy minimalnym udziale wynoszącym **12%** za ośmioautorski artykuł przeglądowy [H2].

Na podstawie opracowania Działu Informacji Naukowej / Sekcji Naukometrii Politechniki Wrocławskiej z dnia 27.09.2023 (Załącznik nr 7):

- łączna liczba cytowań za lata 2005-2023 (z wyłączeniem autocytowań) wszystkich publikacji według bazy *Web of Science* wynosi **79**,
- łączna liczba cytowań za lata 2005-2023 (z wyłączeniem autocytowań) wszystkich publikacji według bazy *Scopus* wynosi **99**,
- łączna liczba cytowań za lata 2005-2023 (z wyłączeniem autocytowań) wszystkich publikacji według bazy *Publish or Perish* wynosi **165**,
- indeks Hirscha według bazy *Web of Science*: **5**,
- indeks Hirscha według bazy *Scopus*: **7**,
- indeks Hirscha według bazy *Publish or Perish*: **7**.

Identyfikatory naukowe i strony internetowe

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9760-7092>
- SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55169379800>

- Web of Science <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30119657>
- Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=SWzsRjAAAAAJ&hl=pl&oi=ao>
- Spis publikacji: <https://dona.pwr.edu.pl/szukaj/default.aspx?nrewid=457010>

4.1 Wyjaśnienie wyboru tematyki badań.

W różnych gałęziach przemysłu najczęściej stosowanymi maszynami są silniki indukcyjne klatkowe oraz silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Nowoczesne układy napędowe charakteryzują się dużym stopniem złożoności. Mimo stosowania elementów o dużej niezawodności układy te ulegają awariom. Podczas eksploatacji silników elektrycznych w częściach elektrycznych obwodów stojana i wirnika oraz w układzie mechanicznym silnika i współpracującej maszynie roboczej wraz z elementami sprzęgającymi dochodzi do licznych uszkodzeń. Według statystyk prowadzonych przez IEEE i EPRI^{1,2} wynika, że w zależności od rodzaju i wielkości maszyny awarie uzwojeń stojana są jedną z najczęstszych przyczyn awarii silników prądu przemiennego i stanowią od 36% do 66% wszystkich awarii. Kolejnym elementem konstrukcyjnym, który często ulega awariom są łożyska, których uszkodzenia stanowią od 13% do 41% wszystkich awarii. Przyczyn uszkodzeń można doszukiwać się już w braku jakości produkcji samej maszyny, wadliwym montażu i instalacji na stanowisku pracy, środowiska, w którym pracuje silnik, charakteru obciążenia oraz późniejszej konserwacji. W normalnych warunkach pracy konstrukcja maszyny zapewnia stabilne współdziałanie sił elektromagnetycznych i mechanicznych ograniczając poziom drgań oraz zakłóceń. Pojawienie się awarii zakłóca równowagę między tymi siłami przyspieszając rozwój uszkodzenia. Każda awaria prowadzi do zakłócenia procesu technologicznego, dlatego możliwość jej wczesnego wykrycia jest jednym z ważniejszych problemów eksploatacyjnych. Zbyt późne wykrycie uszkodzenia silnika w najgorszym przypadku doprowadza do zatrzymania całego procesu, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu kosztów produkcji³.

Każdemu użytkownikowi maszyn wirujących poza bezpieczeństwem i względami ekonomicznymi zależy również na niezawodności. W celu ograniczenia kosztów napraw niezbędne jest jak najszybsze wykrycie początkowej fazy uszkodzenia. Jeszcze do niedawna dominowało planowanie kapitalnych przeglądów i remontów w odpowiednich odstępach czasu. Czas ten był określany na podstawie doświadczeń zdobytych przez użytkownika podczas eksploatacji maszyn. Niestety taki sposób obsługi technicznej silników posiada wiele wad. Współczesne metody diagnostyczne pozwalają wykryć zarówno uszkodzenia elektryczne (w tym zwarcia o różnym charakterze, przerwy w fazie, problemy z nieprawidłowym podłączeniem uzwojeń itp.), mechaniczne (w tym najczęściej występujące uszkodzenia łożysk,

¹ P. O'Donell, Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations: Part I–II, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA, 21, no. 4, pp. 853–872, Jul. 1985.

² J. He, C. Somogyi, A. Strandt, and N. A. O. Demerdash, Diagnosis of stator winding short-circuit faults in an interior permanent magnet synchronous machine, in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), Sep. 2014, pp. 3125–3130.

³ T. Glinka, S. Szymaniec, Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Wydanie I, Warszawa 2019

ekscentryczność, niewyważenie układu napędowego, niewyważenie elementów wirujących, ugięcie wału itp.) jak i związaną z silnikami z magnesami trwałymi demagnetyzację^{4, 5, 6, 7}.

Współcześnie projektowane systemy diagnostyczne powinny być niezawodne oraz wykrywać uszkodzenia występujące w maszynach elektrycznych już we wstępnej fazie ich powstawania, dzięki czemu ich użytkownicy będą mogli z odpowiednim wyprzedzeniem zaplanować niezbędne naprawy. Dodatkowo rozbudowane o sztuczną inteligencję powinny zautomatyzować proces diagnostyczny. Niskobudżetowe systemy diagnostyczne oparte na tanich mikroprocesorach, kartach pomiarowych i dostępnych środowiskach programistycznych charakteryzują się modułową budową, którą w stosunkowo krótkim czasie można rozbudować o nowe funkcjonalności^{8, 9, 10, 11}. *Projektowanie niskobudżetowych systemów pomiarowych i diagnostycznych bazujących na ogólnodostępnych kartach pomiarowych i środowisku programistycznym LabView jest w ostatnich latach jednym z celów moich badań naukowych*¹². Opracowywane i testowane metody przetwarzania sygnałów mogą być implementowane w tego typu systemach diagnostycznych jako osobne moduły.

Do podstawowych sygnałów diagnostycznych wykorzystywanych w procesie wykrywania uszkodzeń występujących w maszynach elektrycznych można zaliczyć: prąd stojana, drgania mechaniczne, hałas czy też temperaturę^{13, 14, 15}. Skuteczność procesu diagnostycznego zależy nie tylko od analizowanego sygnału diagnostycznego, ale przede wszystkim od zastosowanej metody jego przetwarzania. Przykładem może być analiza wartości

⁴ Zhifu Wang, Jingzhe Yang, Huiping Ye, Wei Zhou, A Review of Permanent Magnet Synchronous Motor Fault Diagnosis. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 31 Aug.-3 Sept. 2014, Beijing, China, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940870

⁵ M. Krichen, N. Ben hadj, M. Chaeib, R. Neji, (2017). Fault Detection and Diagnosis Methods in Permanent Magnet Synchronous Machines: A Review. Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Electrical Systems, Dec. 22-24 2017, Hammamet, Tunisia, pp. 229-237.

⁶ Y. Chen, S. Liang, W. Li, H. Liang, C. Wang, Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review. Appl. Sci. 2019, 9, 2116. <https://doi.org/10.3390/app9102116>.

⁷ T. Orłowska-Kowalska, M. Wolkiewicz, P. Pietrzak, M. Skowron, P. Ewert, G. Tarchala, M. Krzysztofiak, C. T. Kowalski, Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of PMSM Drives—State of the Art and Future Challenges, in IEEE Access, vol. 10, pp. 59979-60024, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3180153.

⁸ M. Boudiaf, L. Cherroun, M. BenBrika, Real-time diagnosis of three-phase induction machine using Arduino-Uno card based on park's circle method. Diagnostyka 2018, 19, 63–71. <https://doi.org/10.29354/diag/90641>

⁹ S.-R. Huang, K.-H. Huang, K.-H. Chao, W.-T. Chiang, Fault analysis and diagnosis system for induction motors. Comput. Electr. Eng. 2016, 54, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.01.028>

¹⁰ J.-H. Lee, J.-H. Park, I.-S. Lee, Fault Diagnosis of Induction Motor Using Convolutional Neural Network. Appl. Sci. 2019, 9, 2950. <https://doi.org/10.3390/app9152950>

¹¹ M. Wolkiewicz, M. Skowron, Diagnostic System for Induction Motor Stator Winding Faults Based on Axial Flux. Power Electron. Drives 2017, 2, 137–150. <https://doi.org/10.5277/ped170204>

¹² P. Ewert, C.T. Kowalski, T. Orłowska-Kowalska, Low-Cost Monitoring and Diagnosis System for Rolling Bearing Faults of the Induction Motor Based on Neural Network Approach. Electronics 2020, 9, 1334. <https://doi.org/10.3390/electronics9091334>

¹³ P. Gangsar, R. Tiwari, Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review, Mech. Syst. Sig. Process., 101 (2018), pp. 292-308, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106908>

¹⁴ V.M. Fico, M.A. Martín Prats, C. Ierardi, High Technology Readiness Level Techniques for Brushless Direct Current Motors Failures Detection: A Systematic Review. Energies 2020, 13, 1573. <https://doi.org/10.3390/en13071573>

¹⁵ O. AlShorman, F. Alkhatni, M. Masadeh, M. Irfan, A. Glowacz, F. Althobiani, J. Kozik, W. Glowacz, Sounds and acoustic emission-based early fault diagnosis of induction motor: A review study, Advances in Mechanical Engineering 13:2, 2021, <https://doi.org/10.1177/1687814021996915>

skutecznej drgań mechanicznych, na podstawie której można określić stan techniczny maszyny, ale nie można stwierdzić, co wywołuje nieprawidłowe jej działanie¹⁶.

Ze względu na częstość występowania uszkodzeń łożysk tocznych w maszynach wirujących, cały czas prowadzone są badania nad udoskonalaniem istniejących oraz opracowywaniem nowych metod wykrywania uszkodzeń. Zagadnieniami wykrywania uszkodzeń łożysk zajmuje się wiele czołowych firm diagnostycznych takich jak: Brüel & Kjær, Schenck, IRD, SPM, TEC, SKF, Bently Nevada oraz liczne ośrodki naukowe i instytuty badawcze. Najpopularniejsze metody diagnostyczne bazują na analizie częstotliwościowej drgań. Do detekcji uszkodzeń łożysk wykorzystywane są również analizy częstotliwościowo-czasowe: między innymi analiza falkowa, krótkoczasowa transformata Fouriera STFT (ang. Short-time Fourier transform), bispectrum, transformaty wyższych rzędów oraz metody sztucznej inteligencji¹⁷.

Niewyważenie wirnika oraz niewyosiowanie prowadzą do zmian pola magnetycznego, co przekłada się na zmianę właściwości dynamicznych maszyny oraz generuje dodatkowe składowe w widmie drgań mechanicznych, zwiększa hałas i powoduje pulsacje momentu¹⁸. Sygnały diagnostyczne można analizować w dziedzinie czasu i częstotliwości. Najczęściej stosowaną metodą diagnostyczną jest analiza widmowa sygnału diagnostycznego z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera. Ponadto analizie FFT może zostać moduł wektora przestrzennego prądów stojana. W diagnostyce coraz częściej wykorzystuje się transformacje wyższego rzędu. Do wykrywania niewyważenia można wykorzystać m. in.: bispektrum, pełne spektrum, dyskretną transformację falkową oraz transformatę Hilberta. Automatyzację procesu diagnostycznego można również uzyskać poprzez zastosowanie sieci neuronowych, logiki rozmytej czy klasyfikatorów^{19, 20, 21, 22}.

Ekscentryczność maszyn to stan, w którym występuje nierównomierny rozkład szczeliny powietrznej między stojanem i wirnikiem. Rozróżnienie przyczyn asymetrii pola magnetycznego może być trudne. Mimośrodowość spowodowana jest w dużej mierze tolerancją szczeliny powietrznej między wirnikiem a stojanem, która jest bardzo mała.

¹⁶ ISO 20816-3:2022, Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min, Technical Committee : ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, Publication date : 2022-10

¹⁷ A. Prudhom, J. Antonino-Daviu, H. Razik, V. Climente-Alarcon, Time-frequency vibration analysis for the detection of motor damages caused by bearing currents, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 84, 2017, pp. 747-762, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.12.008>

¹⁸ Zhifu Wang, Jingzhe Yang, Huiping Ye, Wei Zhou, A review of Permanent Magnet Synchronous Motor fault diagnosis, *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 31 Aug.-3 Sept. 2014, Beijing, China, 2014, pp. 1-5

¹⁹ M.A. Hassan, D. Coats, K. Gouda, Y.-J. Shin, Bayoumi, A. Analysis of nonlinear vibration-interaction using higher order spectra to diagnose aerospace system faults. In *Proceedings of the 2012 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 3–10 March 2012*; pp. 1–8.

²⁰ R.R.D. Silva, E.D.S. Costa, R.C.L.D. Oliveira, A.L.A. Mesquita, Fault diagnosis in rotating machine using full spectrum of vibration and fuzzy logic. *J. Eng. Sci. Technol.* 2017, 12, 2952–2964.

²¹ M. Salah, K. Bacha, A. Chaari, Comparative investigation of diagnosis media for induction machine mechanical unbalance fault, *ISA Transactions* Vol. 52, Iss. 6, 2013, pp. 888-899, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2013.07.011>

²² N. Rezazadeh, A. De Luca, D. Perfetto, Unbalanced, cracked, and misaligned rotating machines: a comparison between classification procedures throughout the steady-state operation. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 44, 450, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03750-1>

Niewielkie przekroczenie granic tolerancji może doprowadzić do tarcia wirnika o stojan, a w konsekwencji do uszkodzenia stojana lub wirnika. Przyjmuje się, że mimośrodowość nie powinna przekroczyć 10%. Przekroczenie tej granicy niekorzystnie wpływa na pracę łożysk (zwiększając ich zużycie) oraz zwiększa naprężenia występujące w maszynie. Ocena typu oraz poziomu ekscentryczności najczęściej dokonywana jest w oparciu o symptomy uzyskiwane z analizy: prądu stojana (FFT, widma gęstości mocy, analizy falkowej, analizy składowych głównych PCA (ang. principal component analysis)), drgań mechanicznych (FFT, obwiedni), hałasu (FFT, obwiedni), napięcia indukowanego w cewce umieszczonej w żłobkach stojana (FFT) oraz widma gęstości mocy napięcia stojana, prędkości obrotowej i momentu obciążenia^{23, 24, 25, 26, 27}. Ekscentryczność najczęściej modelowana jest przy użyciu modeli FEM. W badaniach eksperymentalnych mimośrodowość uzyskuje się poprzez stosowanie łożysk z niecentrycznymi tulejami, podkładek regulacyjnych montowanych w obudowie łożyska lub na wale silnika, poprzez modelowanie nieosiowości, przemieszczanie wirnika względem stojana lub mimośrodowe obudowy wałów.

W dostępnej literaturze problem diagnozowania uszkodzeń mechanicznych dotyczy głównie przypadku awarii występujących w silniku indukcyjnym. Większość prac na temat diagnostyki PMSM dotyczy uszkodzeń elektrycznych lub magnetycznych. Obecnie prace badawcze polegają w dużej mierze na weryfikacji, czy metody skuteczne dla silnika indukcyjnego oraz uszkodzeń elektrycznych i magnetycznych w PMSM działają również w przypadku uszkodzeń mechanicznych²⁸.

W odniesieniu do wcześniejszych prac zakończonych przygotowaniem rozprawy doktorskiej, poniżej przedstawiam aktualny wkład w rozwój dyscypliny. W ramach prac realizowanych przed uzyskaniem stopnia doktora zajmowałem się wykrywaniem uszkodzeń łożysk tocznych, niewspółosiowości i ekscentryczności wirnika tylko silnika indukcyjnego. Zrealizowane badania skupiały się na zastosowaniu przede wszystkim analizy FFT do poszukiwania symptomów uszkodzeń w sygnale prądu stojana i drgań mechanicznych. Ponadto opracowane sieci neuronowe w dużej mierze bazowały na prostych, jednokierunkowych sieciach MLP. Tematyka badań omówiona w cyklu publikacyjnym dotyczy zagadnień związanych z wykrywaniem czterech typów uszkodzeń mechanicznych różnych układów napędowych, a w szczególności obejmuje:

²³ B.M. Ebrahimi, M.J. Roshtkhari, J. Faiz, S.V. Khatami, Advanced eccentricity fault recognition in permanent magnet synchronous motors using stator current signature analysis, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 2041-2052, April 2014, 2013. DOI: 10.1109/TIE.2013.2263777

²⁴ F. Lin, S. Zuo, W. Deng, 2827. Impact of rotor eccentricity on electromagnetic vibration and noise of permanent magnet synchronous motor, *Journal of Vibroengineering*, vol. 20, no. 2, pp. 923-935, 2018. DOI <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18436>

²⁵ A.A. Salah, D.G. Dorrell, Y. Guo, A Review of the Monitoring and Damping Unbalanced Magnetic Pull in Induction Machines Due to Rotor Eccentricity, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 3, 2019, pp. 2569-2580, doi: 10.1109/TIA.2019.2892359.

²⁶ J. Faiz, H. Nejadi-Koti, Eccentricity fault diagnosis indices for permanent magnet machines: state-of-the-art, *IET Electric Power Applications*, vol. 13, no. 9, 2019, pp. 1241-1254. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5751>

²⁷ J. Petryna, A. Duda, M. Sułowicz, Eccentricity in Induction Machines—A Useful Tool for Assessing Its Level. *Energies* 2021, 14, 1976. <https://doi.org/10.3390/en14071976>

²⁸ T. Orłowska-Kowalska, M. Wolkiewicz, P. Pietrzak, M. Skowron, P. Ewert, G. Tarchala, M. Krzysztofiak, C. T. Kowalski, Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of PMSM Drives—State of the Art and Future Challenges, in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 59979-60024, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3180153.

1. Opracowanie skutecznych metod diagnostyki łożysk tocznych. Jest to kontynuacja badań, które rozpocząłem już w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej. W cyklu publikacyjnym uwzględniłem badania zrealizowane na silniku indukcyjnym oraz układach napędowych z silnikami PM BLDC i PMSM. Diagnostykę łożysk tocznych rozbudowałem o zastosowanie różnych typów sieci neuronowych. Napędy z magnesami trwałymi przed uzyskaniem stopnia doktora nie były uwzględnione w moich badaniach naukowych.
2. Opracowanie skutecznych metod wykrywania niewyważenia wirnika, które wykrywałem w układach napędowych z silnikiem indukcyjnym klatkowym, PMSM oraz podczas stażu odbytego na Politechnice Poznańskiej na układzie dwumasowym z silnikami PMSM połączonymi długim wałem. W trakcie realizacji rozprawy doktorskiej nie zajmowałem się tym uszkodzeniem. W badaniach uwzględniłem analizę FFT, bispectrum, Full Spectrum, kształtu orbity oraz podczas zrealizowanego stażu analizę STFT.
3. Diagnostykę niewspółosiowości układu napędowego, która została rozszerzona o nowe metody diagnostyczne i przeprowadzona dla silnika indukcyjnego zasilanego z przemiennika częstotliwości. W badaniach uwzględniono analizę FFT przyspieszenia drgań mechanicznych, prądu stojana, modułu wektora przestrzennego prądu stojana, analizę hodografu przemieszczenia drgań, hodografu prądu oraz analizę zdjęć termograficznych.
4. Zastosowanie nowych metod przetwarzania sygnałów i sztucznych sieci neuronowych do wykrywania, identyfikacji i określania poziomu ekscentryczności wirnika silnika indukcyjnego. W badaniach uwzględniono analizę FFT prądu stojana, składowych symetrycznych prądu stojana oraz modułu wektora przestrzennego prądu stojana. Do generowania sygnału diagnostycznego wykorzystano opracowany model polowo-obwodowy silnika z ekscentrycznością.

Przedstawione w cyklu powiązanych tematycznie artykułów metody diagnostyczne tworzą oryginalny wkład w istniejący stan wiedzy na temat wykrywania uszkodzeń mechanicznych silników elektrycznych, a zatem stanowią mój wkład w rozwój dyscypliny naukowej. Uzyskane wyniki zostały szczegółowo omówione w dalszej części niniejszego autoreferatu.

Postawione cele naukowe można zebrać w trzy główne zagadnienia, które realizowałem równolegle:

1. opracowanie skutecznych metod wykrywania i klasyfikacji uszkodzeń łożysk tocznych przy wykorzystaniu analizy sygnału drgań mechanicznych i sztucznych sieci neuronowych [H3], [H4], [H6], [H7], [H9];
2. zastosowanie metod przetwarzania sygnałów drgań mechanicznych oraz prądu stojana do skutecznej detekcji niewyważenia wirnika w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym i PMSM [H1], [H5], [H12];
3. diagnostyka niewspółosiowości i ekscentryczności wirnika silnika indukcyjnego [H8], [H10], [H11].

Cel nr 1 został przedstawiony w publikacjach [H3], [H4], [H6], [H7] i [H9]. W publikacjach [H3] i [H4] omówiono diagnostykę łożysk tocznych silnika PMSM przy wykorzystaniu sieci neuronowych, w [H7] omówiono wybrane metody przetwarzania drgań

mechanicznych na potrzeby wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych silnika PM BLDC, natomiast w [H6] i [H9] omówiono diagnostykę i klasyfikację uszkodzeń łożysk tocznych w silnikach indukcyjnych przy wykorzystaniu metod przetwarzania drgań mechanicznych i sieci neuronowych. Osobnym zagadnieniem i jednocześnie celem nr 2 było opracowanie skutecznych metod wykrywania niewyważenia wirnika silnika indukcyjnego (omówionych w [H5] i [H12]) oraz PMSM, przedstawionych w [H1]. Celem nr 3 była analiza możliwości wykrywania niewspółosiowości układu napędowego z silnikiem indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości przedstawiona w [H10] oraz ekscentryczności, która została uzyskana na drodze modelowania połowo-obwodowego (omówiona w [H8] i [H11]).

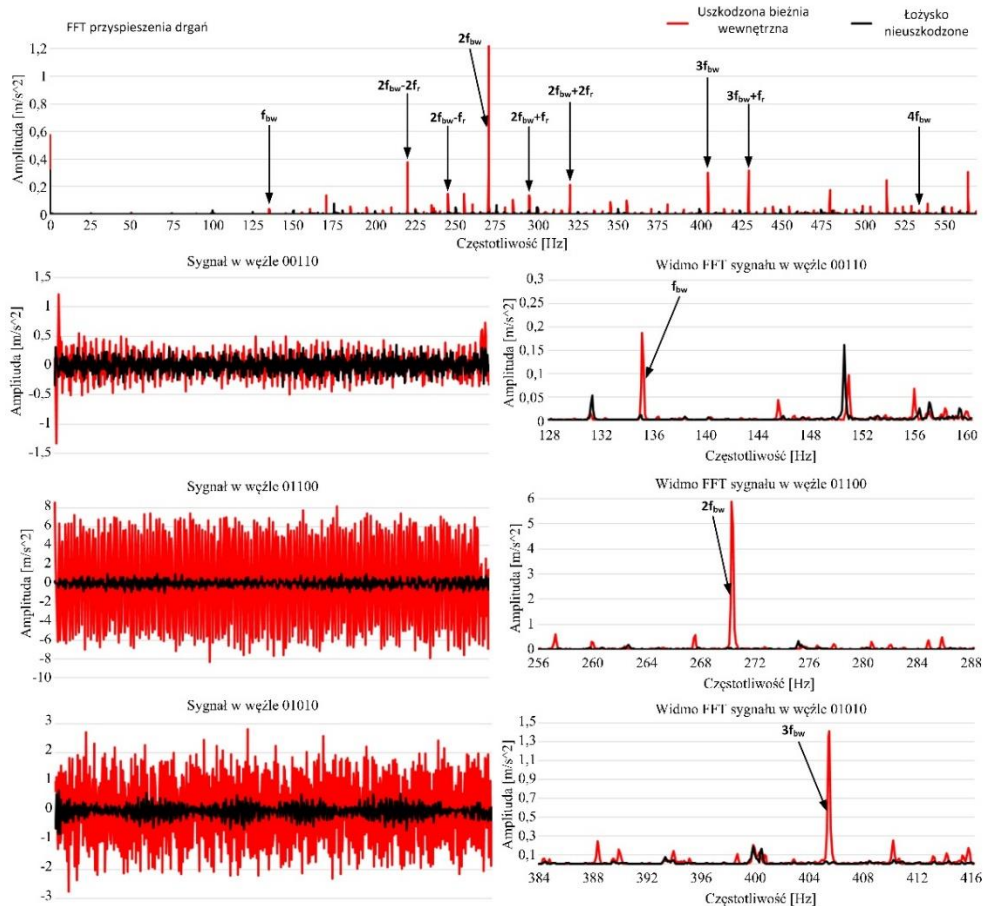
Wszystkie prezentowane w publikacjach badania zostały zrealizowane w warunkach laboratoryjnych na silnikach małej mocy różnych producentów. Badane silniki zasilane były zarówno bezpośrednio z sieci jak i z przemiennika częstotliwości pracującego w układzie sterowania skalarnego $U/f=\text{const.}$ oraz w zamkniętej pętli sterowania. Wyjątkiem była analiza ekscentryczności, która została przeprowadzona w oparciu o sygnał prądu stojana uzyskany z modelu połowo-obwodowego. Do pomiarów wykorzystano kontroler przemysłowy oraz karty pomiarowe firmy National Instruments. Do akwizycji danych pomiarowych użyto wirtualnych przyrządów pomiarowych budowanych w środowisku LabView, które oprócz pomiaru wybranych sygnałów diagnostycznych umożliwiały ich analizę wybraną metodą oraz ekstrakcję symptomów uszkodzeń. Omawiane w artykułach detektory neuronowe były opracowane w środowisku MATLAB. Dodatkowo w pracy [H6] przedstawiono autorski system diagnostyczny wykonany w środowisku LabView umożliwiający identyfikację uszkodzeń łożysk tocznych przy wykorzystaniu sieci neuronowych.

4.2 Cel nr 1 – Opracowanie skutecznych metod wykrywania i klasyfikacji uszkodzeń łożysk tocznych przy wykorzystaniu analizy sygnału drgań mechanicznych i sztucznych sieci neuronowych [H3], [H4], [H6], [H7], [H9].

Metody wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych najczęściej bazują na analizie przyspieszenia drgań mechanicznych. W [H9] skupiłem się na sprawdzeniu możliwości zastosowania analizy falkowej do wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych silnika indukcyjnego. Podejście to wynika z faktu, że analiza FFT nie nadaje się do analizy sygnałów niestacjonarnych, czyli może ukrywać występujące w nich krótkoczasowe osobliwości szczególnie często spotykane w uszkodzeniach łożysk tocznych. Z tego powodu sprawdziłem przydatność analizy falkowej do wykrywania tego typu uszkodzeń. W [H9] zostały przedstawione wyniki uzyskane dla dyskretnej transformaty falkowej oraz pakietowej analizy falkowej. Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone na silniku indukcyjnym o mocy 1,5 kW zasilanym z sieci.

Przedstawione w artykule wyniki badań laboratoryjnych pokazują, że pomocna w detekcji uszkodzonego łożyska tocznego może być analiza wartości skutecznej sygnałów aproksymat i detali dyskretnej przekształcenia falkowego, obejmujących swym zakresem charakterystyczne dla danego uszkodzenia częstotliwości. Ponadto wykonanie analizy FFT sygnału aproksymat i detali pozwala jednoznacznie określić, który element konstrukcyjny łożyska został uszkodzony. Pakietowa analiza falkowa w odróżnieniu od dyskretnej pozwala na wielopoziomową analizę nie tylko kolejnych aproksymacji ale również i detali. Analiza sygnału na coraz niższych poziomach dekompozycji zawęża zakres częstotliwości każdego z węzłów. Dzięki temu dany węzeł może zawierać np. tylko jedną charakterystyczną

częstotliwość uszkodzeniową łożyska. Niestety tego typu podejście zmusza użytkownika do rozrysowania drzewa dekompozycji i dokładnego określenia zakresu częstotliwości każdego z węzłów. W przypadku silników asynchronicznych należy pamiętać, że charakterystyczne dla uszkodzonego łożyska częstotliwości zależą od częstotliwości obrotowej f_r , czyli od obciążenia silnika. Zmianę wartości analizowanej częstotliwości należy uwzględnić już na etapie wyboru węzłów zawierających symptomy uszkodzenia. Na podstawie przeprowadzonych badań udało się stwierdzić, że *analiza falkowa przyspieszenia drgań jest odporna na zmiany obciążenia, a dodatkowe drgania pochodzące od maszyny roboczej nie utrudniają diagnostyki uszkodzeń łożysk tocznych*. Na rys. 4.1 przedstawiłem widmo FFT przyspieszenia drgań oraz sygnały i ich widma FFT z wybranych węzłów z piątego poziomu pełnej dekompozycji falkowej. *Amplitudy charakterystycznych częstotliwości w badanych węzłach znacząco wzrosły w porównaniu do amplitud częstotliwości uzyskanych z analizy FFT przyspieszenia drgań. Zauważalny jest również wzrost wartości skutecznej sygnałów w wybranych węzłach z piątego poziomu dekompozycji, co widać na przebiegach czasowych. Wyraźny wzrost amplitud powinien ułatwiać wykrycie pierwszych symptomów uszkodzonego łożyska.*



Rys. 4.1. Widmo FFT sygnału przyspieszenia drgań oraz przebiegi czasowe sygnałów z wybranych węzłów z piątego poziomu dekompozycji i ich widma FFT dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną

Istotnym zagadnieniem omówionym również w artykule [H9] jest właściwe dobranie typu falki do charakteru analizowanego sygnału, co ma ogromny wpływ na wynik analizy. Jej odpowiedni kształt pozwala na wyodrębnienie właściwego sygnału spośród przypadkowych

zakłóceń. W artykule przeprowadzono analizę porównawczą dla dekompozycji sygnału przyspieszenia drgań mechanicznych dla falek z rodzin Daubechies, Coiflets, Symlets oraz falek bioortogonalnych. Punktem odniesienia była falka Daubechies rzędu 10 (db10).

Na podstawie zrealizowanych badań porównawczych można stwierdzić, że *prawidłowy dobór typu falki do charakteru analizowanego sygnału ma bardzo istotne znaczenie, odpowiedni kształt pozwala na wyselekcjonowanie właściwego sygnału spośród przypadkowych zakłóceń*. Błędne dobranie falek do analizowanego sygnału powoduje wzmocnienie amplitud przypadkowych częstotliwości, przez co amplituda charakterystycznych dla uszkodzonego łożyska symptomów nie jest dominująca w węźle i może być niezauważona. Falki Coiflets rzędu 5 oraz Symlets rzędu 7, będące falkami najwyższego rzędu w swoich rodzinach, dają zadowalający rezultat.

Istotny z punktu widzenia poprawnej detekcji symptomów uszkodzenia jest czas mierzonego sygnału oraz częstotliwość próbkowania, które determinują ilość próbek, a więc i rozdzielczość badanego sygnału. Rozdzielczość sygnału ma natomiast wpływ na prawidłowe wykrywanie symptomów uszkodzeń. W [H9] przedstawiłem wyniki uzyskane z pakietowej analizy falkowej na piątym poziomie dekompozycji dla uszkodzonej bieżni wewnętrznej łożyska, w których zmniejszono liczbę próbek sygnału pomiarowego z 20480 do 512, co zmieniło rozdzielczość widma sygnału z 0,1 do 4 Hz. Czas rejestracji po skróceniu liczby próbek skrócił się z 10 s na 0,25 s. Na podstawie analizy uzyskanych wyników (przykładowe zestawienie umieściłem w tab. 4.3) mogę stwierdzić, że *diagnostyka uszkodzeń łożysk tocznych na podstawie widma FFT sygnałów w wybranych węzłach przy tak małej rozdzielczości jest niemożliwa do przeprowadzenia. Można jednak obserwować zmiany wartości skutecznej RMS oraz zmiany wartości energii węzłów dekompozycji pakietowej transformaty falkowej*. Wzrost tych wartości jest największy w węzłach, których zakres częstotliwości obejmuje charakterystyczne częstotliwości uszkodzeniowe łożyska. Na tej podstawie mogę stwierdzić, że *pakietowa transformata falkowa umożliwia zdiagnozowanie uszkodzenia danego elementu konstrukcyjnego łożyska nawet przy bardzo małej rozdzielczości analizowanego sygnału*.

Tab. 4.3. Wartości skuteczne oraz wartości energii wybranych węzłów na piątym poziomie dekompozycji sygnału przyspieszenia drgań dla łożyska nieuszkodzonego oraz z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną dla rozdzielczości $df=0,1$ Hz oraz $df=4$ Hz

| Węzeł | df | Łożysko nieuszkodzone | | Uszkodzona bieżnia wewnętrzna | | Częstotliwość uszkodzeniowa |
|-------|-----|-----------------------|---------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
| | | RMS | Energia | RMS | Energia | |
| 00100 | 0,1 | 0,33 | 72,96 | 3,48 | 7983,26 | $2f_{bw}-f_r$ |
| | 4 | 0,33 | 3,62 | 3,61 | 443,59 | |
| 00101 | 0,1 | 0,2 | 26,15 | 1,36 | 1214,43 | $2f_{bw}-2f_r$ |
| | 4 | 0,13 | 0,56 | 1,14 | 44,1 | |
| 01011 | 0,1 | 0,26 | 45,2 | 1,48 | 1438 | $3f_{bw}+f_r$ |
| | 4 | 0,28 | 2,66 | 1,76 | 105,66 | |
| 01100 | 0,1 | 0,38 | 95,51 | 4,59 | 13852 | $2f_{bw}$ |
| | 4 | 0,32 | 3,46 | 4,37 | 665,97 | |
| 01101 | 0,1 | 0,35 | 79,62 | 1,06 | 743,38 | $2f_{bw}+2f_r$ |
| | 4 | 0,24 | 1,97 | 1,13 | 43,26 | |

W badaniach naukowych i praktyce eksploatacyjnej napędów elektrycznych poszukuje się nowych, niezawodnych rozwiązań systemów diagnostycznych. Aktualnie odchodzi się od drogich, wyspecjalizowanych rozwiązań na rzecz systemów nisko budżetowych. Tego typu rozwiązania bazują na kartach pomiarowych i ogólnie dostępnych środowiskach programistycznych. Ponadto zaletą tego typu podejścia jest elastyczność opracowanych systemów diagnostycznych, które można stosunkowo szybko rozszerzyć o nowe funkcjonalności poprzez dołączenie nowych modułów zawierających np. zaawansowane metody przetwarzania sygnałów, czy też sieci neuronowe.

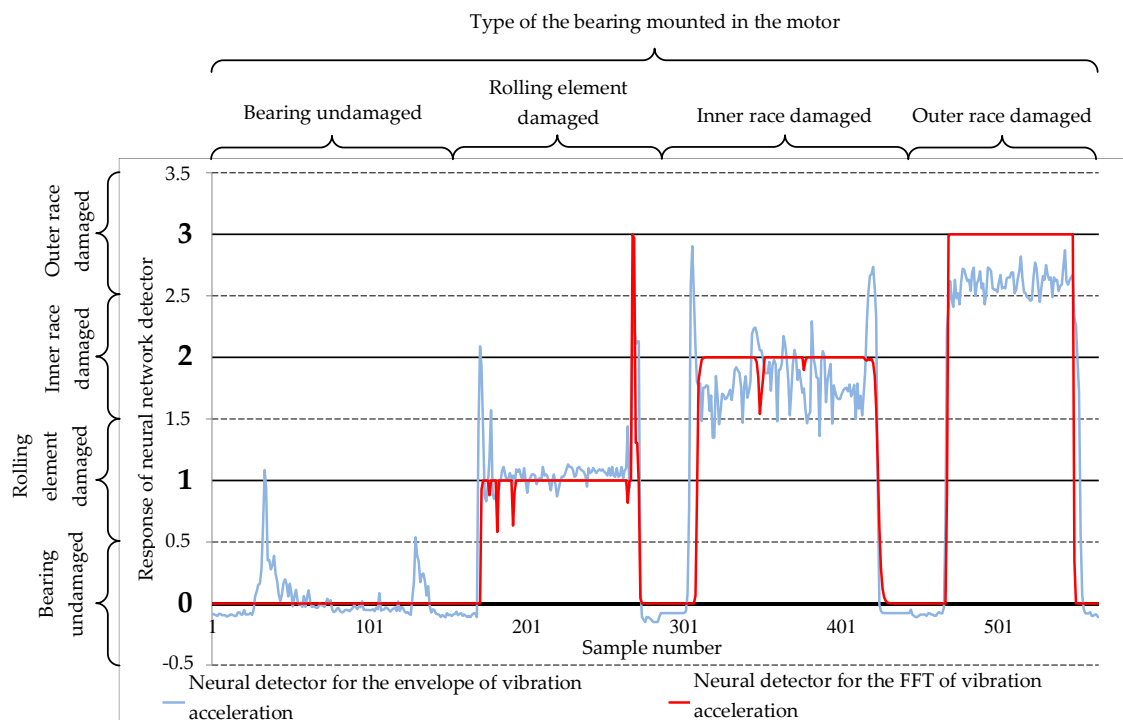
W [H6] przedstawiłem nisko budżetowe rozwiązanie komputerowego systemu do wczesnego wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych w silnikach indukcyjnych przy zastosowaniu detektorów neuronowych bazujących na analizie widmowej przyspieszenia drgań oraz obwiedni przyspieszenia drgań. Ponadto przedstawiłem sposób zastosowania sztucznych sieci neuronowych do detekcji uszkodzeń elementów konstrukcyjnych łożysk tocznych.

Opracowany system diagnostyczny charakteryzuje się modułową budową, dzięki czemu jego funkcjonalność może być w przyszłości rozszerzona o dodatkowe metody przetwarzania sygnałów lub inne warianty sieci neuronowych. W przygotowanej pierwszej wersji komputerowego systemu do monitorowania stanu łożysk tocznych zaimplementowałem możliwość tworzenia i przeglądania bazy silników elektrycznych, możliwość dodawania i przeglądania bazy z łożyskami tocznymi. Trzeci zaimplementowany moduł to główny element aplikacji, czyli ciągle monitorowanie aktualnego stanu maszyny z możliwością tworzenia bazy danych rejestrowanego sygnału w trybie automatycznym oraz ręcznym. Moduł ten został wyposażony w dwa niezależne detektory neuronowe umożliwiające automatyczną ocenę stanu technicznego łożyska. Jeden z zaimplementowanych detektorów oparty był na informacjach pochodzących z analizy FFT przyspieszenia drgań a drugi pracował w oparciu o symptomy pochodzące z analizy FFT obwiedni przyspieszenia drgań. Moduł ten daje również możliwość generowania szczegółowych raportów uwzględniających informacje występujące w tym module. Opracowana aplikacja umożliwia również ponowne odtworzenie wcześniej zarejestrowanych sygnałów pomiarowych. Funkcjonalność ta zastała przeze mnie zaimplementowana w module czwartym i podobnie jak poprzednio możliwe jest wygenerowanie szczegółowego raportu z wcześniej zarejestrowanych danych.

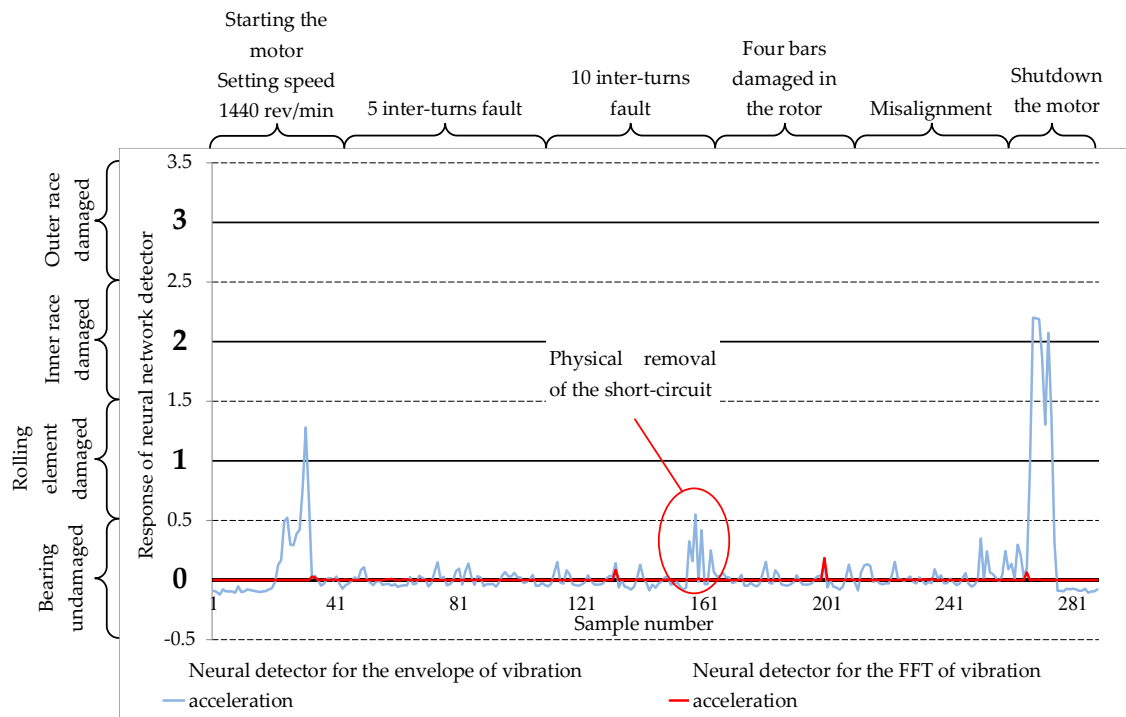
W opracowanym systemie diagnostycznym zaimplementowałem dwie stosunkowo proste jednokierunkowe, wielowarstwowe sieci neuronowe MLP (*Multi Layer Perceptron*). Sieci te zostały wytrenowane w środowisku MATLAB-Simulink za pomocą pakietu MATLAB Neural Network Toolbox. W procesie treningu sieci neuronowej wykorzystałem algorytm Levenberga-Marquardta. Wstępna analiza widm pozwoliła określić symptomy uszkodzeń, które zostały podane na wejścia sieci neuronowych. Zadaniem opracowanych detektorów jest wykrycie rodzaju uszkodzonego elementu konstrukcyjnego łożyska na podstawie pięciu symptomów ($2f_b$, $4f_b$, f_{ir} , $2f_{ir}$ oraz $2f_{or}$ to amplitudy charakterystycznych częstotliwości dla: elementu tocznego (f_b), bieżni wewnętrznej (f_{ir}) oraz bieżni zewnętrznej (f_{or})) uzyskanych z analizy FFT przyspieszenia drgań mechanicznych lub FFT obwiedni przyspieszenia drgań mechanicznych. Dodatkowo wektor wejściowy rozszerzyłem o częstotliwość obrotową f_r , co umożliwiło uwzględnienie zmiennego obciążenia. W trakcie procesu uczenia i wstępnego testowania przebadałem sieci o różnych topologiach, zmieniając liczbę neuronów w warstwie ukrytej, co pozwoliło wybrać struktury, które zaimplementowałem w aplikacji. Szczegółowe

przedstawienie skuteczności analizowanych detektorów neuronowych (również tych nie zaimplementowanych w systemie diagnostycznym) omówiłem w [H6].

Badania w trybie on-line przeprowadziłem na silniku indukcyjnym o mocy 1,5 kW zasilanym z sieci. Obciążenie silnika stanowiła maszyna prądu stałego. Badania zrealizowałem przy wykorzystaniu komputera przemysłowego NI PXI 8186 wyposażonego w kartę pomiarową NI USB 9234. Do pomiaru drgań użyłem akcelerometr jednoosiowy typ 3185D firmy DYTRAN, który zainstalowany był na pokrywie łożyska silnika. Badania przeprowadziłem w dwóch seriach pomiarowych. W pierwszej sprawdzałem skuteczność identyfikacji zamontowanych uszkodzonych łożysk tocznych. W badaniach zastosowałem łożyska nie używane w procesie uczenia sieci neuronowych. Na rys. 4.2 zaznaczyłem rodzaj zamontowanego łożyska w silniku oraz odpowiedź sieci neuronowych (pierwszej bazującej na informacji z analizy FFT obwiedni przyspieszenia drgań oraz drugiej na analizie FFT przyspieszenia drgań). W każdym przypadku dokonywano rozruchu silnika z autotransformatora. Następnie silnik stopniowo obciążano do wartości znamionowej. W ostatniej fazie wyłączano obciążenie a następnie obniżano napięcie zasilania do zera. Można zauważyć, że przez większość czasu oba detektory neuronowe prawidłowo odwzorowywały stan łożyska. Większość pomyłek występowała w momencie zmiany obciążenia (w stanach nieustalonych). Opracowane detektory neuronowe były również odporne na inne modelowane uszkodzenia w silniku z zamontowanymi nieuszkodzonymi łożyskami, co przedstawiłem na rys. 4.3.



Rys. 4.2. Odpowiedzi sieci neuronowych o strukturze 6-3-1 na stan łożysk zamontowanych w badanym silniku

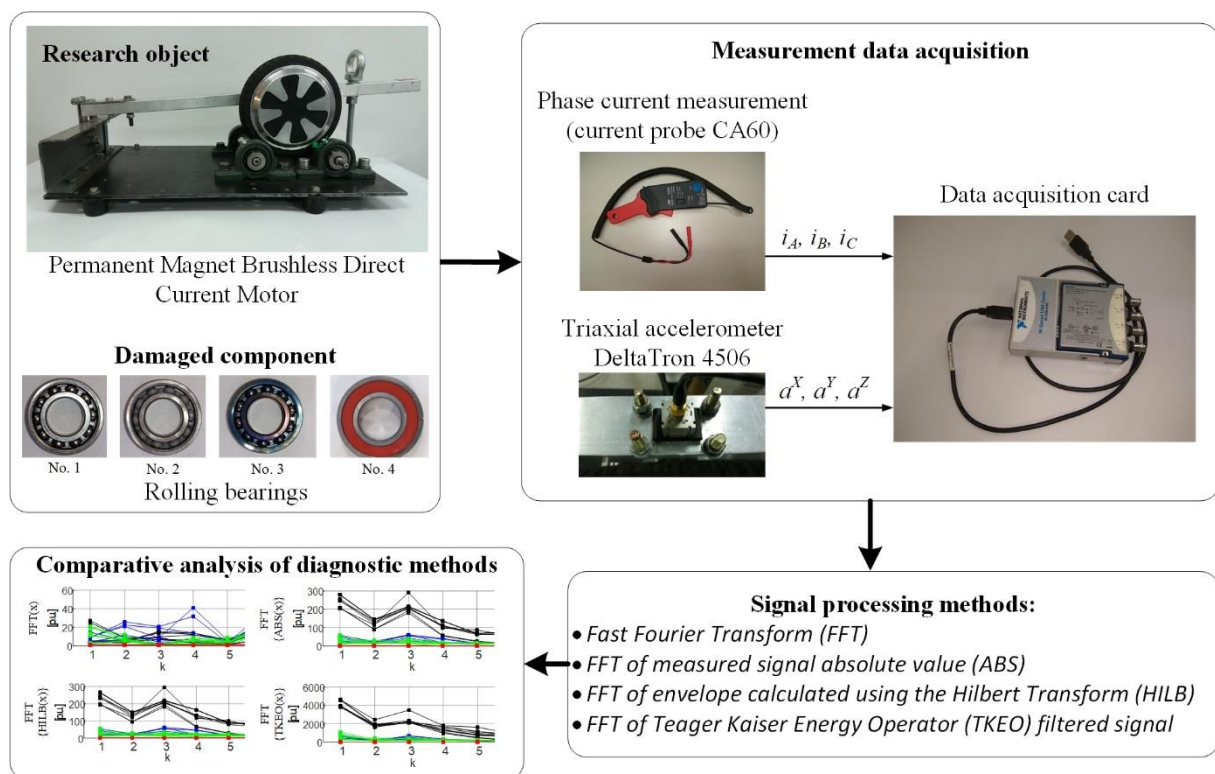


Rys. 4.3. Odpowiedzi detektora neuronowego na inne uszkodzenia silnika

Przedstawione wyniki testów prototypowego systemu diagnostycznego potwierdziły skuteczność zaproponowanych metod diagnostycznych i zaimplementowanych detektorów neuronowych w wykrywaniu uszkodzeń łożysk tocznych. Ponadto modułowa struktura systemu zapewnia dużą elastyczność funkcjonalną oraz możliwość rozbudowy o dodatkowe pomiary i metody przetwarzania sygnałów diagnostycznych. Zaimplementowane detektory neuronowe mimo małej liczby neuronów w warstwie ukrytej (6-3-1) charakteryzowały się wysoką skutecznością oraz prawidłowo reagowały w sytuacji wystąpienia innych uszkodzeń. Przeprowadzone testy laboratoryjne wykazały, że opracowany prototyp niskobudżetowego systemu monitorująco-diagnostycznego może być zastosowany, jako uzupełnienie obecnie stosowanych rozwiązań przemysłowych lub jako niezależny system.

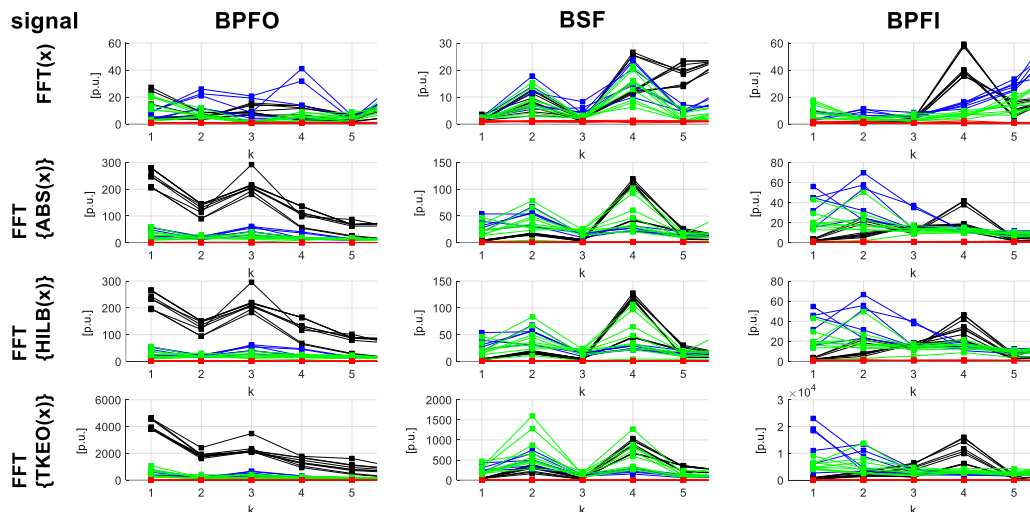
Ze względu na obserwowany wzrost zastosowania silników PM BLDC w różnych układach napędowych celem pracy [H7] było porównanie czterech prostych metod przetwarzania sygnałów drganiowych pod kątem skuteczności wykrywania uszkodzeń elementów konstrukcyjnych łożysk tocznych. W pracy analizowano sygnał przyspieszenia drgań mierzony czujnikiem trójosiowym. Do badań wybrałem silnik PM BLDC, używany w napędzie małego pojazdu elektrycznego, np. deskorolki lub hulajnogi. Jest to kompletny napęd w kole, o odwróconej budowie, tj. zewnętrzną częścią silnika jest wirujący wirnik, obłożony gumową oponą z bieżnikiem. Jest to odmienna w porównaniu do silnika indukcyjnego konstrukcja, która wymagała zaprojektowania i zbudowania nowego stanowiska. Na rys. 4.4 przedstawiłem poglądowy schemat metodyki badań silnika PM BLDC z przedstawionym obiektem badań (silnik i uszkodzone łożyska), systemem akwizycji danych, metodami przetwarzania sygnałów oraz przykładowym porównaniem analiz. Na potrzeby testów przygotowałem nowy zestaw uszkodzonych łożysk, w skład których oprócz łożyska nowego (n. 1) weszły: łożysko poddane piaskowaniu (n. 2), łożysko uszkodzane spawarką, symulując w ten sposób mikro wżery (n. 3) oraz z przeciętą bieżnią zewnętrzną (n. 4). Do

pomiaru drgań użyto akcelerometru trójosiowego typu DeltaTron4506 firmy Brüel & Kjær. Dodatkowo do wyznaczenia częstotliwości zasilania i częstotliwości obrotowej silnika rejestrowano i analizowano jeden z prądów fazowych. Akwizycji danych pomiarowych dokonałem kartą pomiarową NI 9234 firmy National Instruments z częstotliwością próbkowania 10,24 kHz przez okres 10 s. Zmierzony sygnał przyspieszenia drgań w celu uzyskania symptomów uszkodzonych łożysk tocznych poddany został czterem metodom przetwarzania sygnałów: analizie FFT sygnału przyspieszenia drgań w osi X ($FFT(x)$), analizie częstotliwościowej modułu sygnału przyspieszenia drgań w osi X ($FFT\{ABS(x)\}$), analizie częstotliwościowej modułu sygnału po transformacji Hilberta przyspieszenia drgań w osi X ($FFT\{HILB(x)\}$) oraz analizie częstotliwościowej sygnału przyspieszenia drgań w osi X, przefiltrowanego Operatorem Energetycznym Teagera-Kaisera TKEO ($FFT\{TKEO(x)\}$).



Rys. 4.4. Poglądowy schemat metodyki badań silnika PM BLDC z przedstawionym obiektem badań, systemem akwizycji danych, metodami przetwarzania sygnałów oraz przykładowym porównaniem analiz [H7]

Analiza porównawcza zastosowanych metod przetwarzania sygnału przyspieszenia drgań wykazała, że największe zmiany można zauważyć dla podstawowych częstotliwości uszkodzeniowych i ich kilku kolejnych wielokrotności. Na rys. 4.5 przedstawiłem zbiorcze zestawienie uwzględniające jedynie zmiany częstotliwości uszkodzeniowych, od podstawowej ($k=1$) do piątej wielokrotności ($k=5$). Badania laboratoryjne wykonano wielokrotnie dla danego przypadku uszkodzenia, dlatego na rysunku występuje wiele krzywych w tym samym kolorze. Zestawienie prezentuje wyniki w jednostkach względnych, gdzie wielkością bazową jest wartość średnia amplitud charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych dla łożyska nieuszkodzonego.



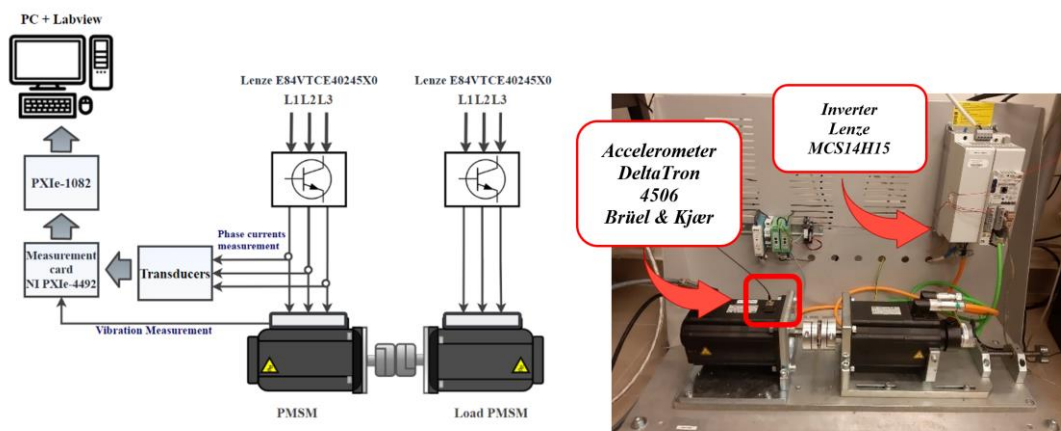
Rys. 4.5. Zbiorcze zestawienie amplitud krotności podstawowych częstotliwości uszkodzeniowych uzyskanych z różnych metod przetwarzania sygnału dla symptomów uszkodzenia bieżni zewnętrznej (BPFO), elementu tocznego (BSF) i bieżni wewnętrznej łożyska (BPFI) – analiza przyspieszenia drgań w osi X (kolor czerwony – łożysko n.1, zielony – n.2, niebieski – n.3 i czarny – n.4)

Analiza zestawienia zbiorczego (rys. 4.5) potwierdza, że zastosowanie dodatkowego przetwarzania sygnału drgań wzmacnia amplitudę początkowych wielokrotności częstotliwości uszkodzeniowych, co zdecydowanie ułatwia wykrycie uszkodzenia i ocenę stanu łożyska. W artykule [H7] pokazano, że zastosowanie dodatkowego przetwarzania sygnałów opartego na transformacie Hilberta, filtrze TKEO oraz transformacie z wartości bezwzględnej, umożliwia lepsze monitorowanie stanu łożyska w porównaniu do klasycznej analizy FFT przyspieszenia drgań mechanicznych. W tych metodach obserwowane względne wzrosty amplitud są na poziomie kilkudziesięciu do kilkuset razy, a nawet kilku tysięcy w przypadku TKEO. Zaproponowane metody są niewymagające obliczeniowo (oprócz transformaty Hilberta, która wymaga dodatkowego całkowania) i w realizacji mikroprocesorowej mogą pełnić rolę detektorów uszkodzeń łożysk pracujących w trybie online.

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi cieszą się coraz większym zainteresowaniem zarówno w zastosowaniach przemysłowych jak i w napędach pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Niestety nie są to napędy niezawodne. Podobnie jak w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi częstym awariom mogą ulegać zastosowane łożyska toczne. W literaturze problem diagnozowania uszkodzeń łożysk tocznych jest przedstawiany głównie w przypadku awarii występujących w silniku indukcyjnym. Większość prac na temat diagnostyki PMSM dotyczy uszkodzeń elektrycznych lub magnetycznych. W pracach dotyczących detekcji uszkodzeń łożysk tocznych w PMSM najczęściej omawia się konwolucyjne sieci neuronowe. Zdecydowanie mniej prac badawczych dotyczących detekcji uszkodzeń łożysk tocznych w PMSM opisuje zastosowanie klasycznych sieci neuronowych. Struktury te są o wiele prostsze w budowie w porównaniu do sieci opartych o metody głębokiego uczenia oraz wymagają mniejszej złożoności obliczeniowej. Ponadto odpowiednio sparametryzowana struktura umożliwia uzyskanie skuteczności na bardzo wysokim poziomie. Wyniki krytycznej analizy literatury z zakresu klasyfikacji uszkodzeń występujących

w napędzie PMSM i metod ich wykrywania przedstawiono opracowanym artykule przeglądowym [H2].

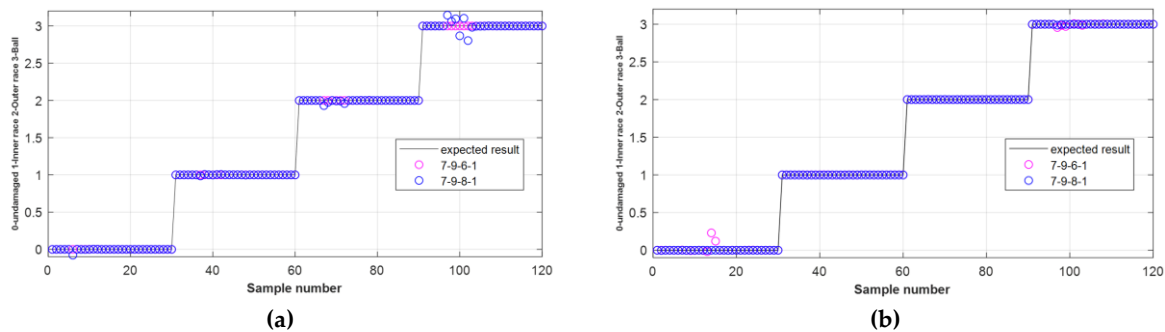
Na podstawie przeprowadzonego krytycznego przeglądu literatury, mogę stwierdzić, że porównanie skuteczności różnych typów detektorów neuronowych wykorzystywanych do diagnostyki łożysk tocznych w PMSM jest bardzo rzadko omawiane. Autorzy bardzo często skupiają się na możliwościach tylko jednego rodzaju sieci neuronowych. Ponadto detekcja uszkodzeń łożysk tocznych w PMSM jest rzadziej omawiana w literaturze niż popularnych silników indukcyjnych. Dlatego celem artykułu [H3] była analiza porównawcza trzech wybranych typów sieci neuronowych do detekcji uszkodzeń łożysk tocznych w PMSM. Do uzyskania symptomów diagnostycznych zastosowano dwie (sprawdzone dla silnika indukcyjnego) metody przetwarzania sygnałów: szybką transformatę Fouriera (FFT) oraz transformatę Hilberta w celu uzyskania sygnału obwiedni, który poddano analizie FFT. W artykule przedstawiono możliwość zastosowania perceptronów wielowarstwowych, sieci neuronowych o radialnych funkcjach bazowych oraz map Kohonena do wykrywania uszkodzenia łożyska. Analizie poddano dwa warianty działania detektorów: pierwszy określał, czy występuje uszkodzenie, drugi identyfikował typ uszkodzonego elementu konstrukcyjnego łożyska. Ponadto artykuł został rozbudowany o wpływ (w zależności od typu sieci neuronowej): topologii sieci, funkcji aktywacji, metody uczenia i współczynnika uczenia na skuteczność detekcji lub klasyfikacji. Wszystkie sieci neuronowe były uczone w środowisku MATLAB-Simulink za pomocą pakietu MATLAB Neural Network Toolbox. Na potrzeby wykonania badań laboratoryjnych wykorzystano nowe stanowisko wyposażone w dwa silniki PMSM firmy Lenze o mocy 2,5 kW. Silnik sterowany w trybie wektorowym zasilany był z przekształtnika firmy Lenze. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem komputera przemysłowego NI PXIe-1082 oraz karty pomiarowej NI PXIe-4492 firmy National Instruments. Badania zrealizowano dla silnika, w którym zamontowałem łożyska z zamodelowanymi uszkodzeniami bieżni zewnętrznej, wewnętrznej i elementów tocznych oraz łożyska bez defektu. Do pomiaru przyspieszenia drgań wykorzystano akcelerometr DeltaTron 4506 firmy Brüel & Kjær. Do akwizycji danych pomiarowych oraz wstępnej analizy sygnałów wykorzystałem aplikację opracowaną w środowisku LabView. Pomiary przeprowadzono w trzech seriach przy zmiennej częstotliwości zasilania oraz zmiennym momencie obciążenia. Dwie serie wykorzystano do nauki sieci neuronowych, trzecią do ich testowania. Na rys. 4.6 przedstawiłem schemat ideowy oraz zdjęcie stanowiska badawczego.



Rys. 4.6. Schemat ideowy oraz zdjęcie stanowiska badawczego

Wejściami przebadanych sieci neuronowych były amplitudy symptomów uzyskanych z analizy FFT drgań mechanicznych oraz obwiedni drgań mechanicznych (ENV).

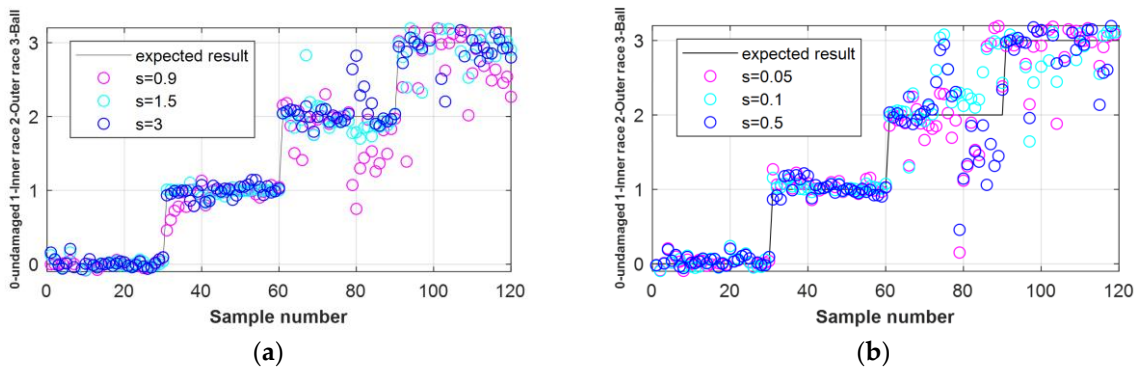
Przeprowadzone liczne testy zarówno detektorów jak i klasyfikatorów MLP wykazały, że w ponad 95% udzielały one prawidłowych odpowiedzi. Zastosowanie funkcji aktywacji *logsig* wpływa korzystnie nie tylko na skuteczność działania, ale również na wzrost stabilności procesu uczenia w odniesieniu do funkcji *tansig*, zarówno w przypadku zastosowania ENV jak i samej FFT. W przypadku klasyfikatora lokalizującego uszkodzenie struktury z jedną warstwą ukrytą okazały się niewystarczające dla badanego problemu. Odpowiedzi znacznie odbiegały od wartości oczekiwanych. W przypadku detektorów neuronowych tylko wykrywających uszkodzenia, zarówno struktury z jedną warstwą ukrytą (np. 7-4-1) jak i z dwoma warstwami ukrytymi (np. 7-5-4-1) charakteryzowały się zbliżoną skutecznością. Przykładowe działanie klasyfikatora uszkodzeń bazującego na ENV oraz FFT pokazałem na rys. 4.7.



Rys. 4.7. Przebiegi wartości wyjściowych z klasyfikatora uszkodzeń opartego na MLP (typ II) z wykorzystaniem funkcji aktywacji *tansig*, metody uczenia się *trainlm*, współczynnika uczenia $\eta = 0,5$ dla różnych struktur MLP na podstawie analiz ENV (a) lub FFT (b)

Kolejnym typem przebadanych sieci neuronowych były sieci RBF (ang. Radial Basis Function), które w odróżnieniu od MLP charakteryzują się powtarzalnością wyników w procesie uczenia. Zastosowanie ENV w przypadku danych uczących sieci RBF spowodowało poprawne działanie sieci dla większej liczby wartości parametru *spread* σ (rozpiętość funkcji aktywacji), w porównaniu do symptomów z FFT. Znacznie ułatwiło to dobór parametru σ w procesie uczenia detektorów. Na podstawie przeprowadzonych badań mogę stwierdzić, że dla danych z analizy FFT wraz ze wzrostem wartości parametru σ rośnie skuteczność sieci neuronowych, a od wartości 0,3 zaczyna spadać. W przypadku danych z zastosowaniem ENV zwiększanie wartości parametru nawet do kilkakrotnie przewyższającej analizowane dla FFT nie powodowało spadku skuteczności.

Detektor określający rodzaj uszkodzenia łożyska w przypadku sieci RBF również działa poprawnie dla większego zbioru parametru *spread* po zastosowaniu ENV, jednak nie tak rozpiętego jak dla detektora wykrywającego uszkodzenie. Na dokładnych przebiegach wyjściowych (rys. 4.8) można zauważyć, że odpowiedź sieci RBF mocno oscyluje od wartości oczekiwanej, nawet w przypadku zastosowania ENV.

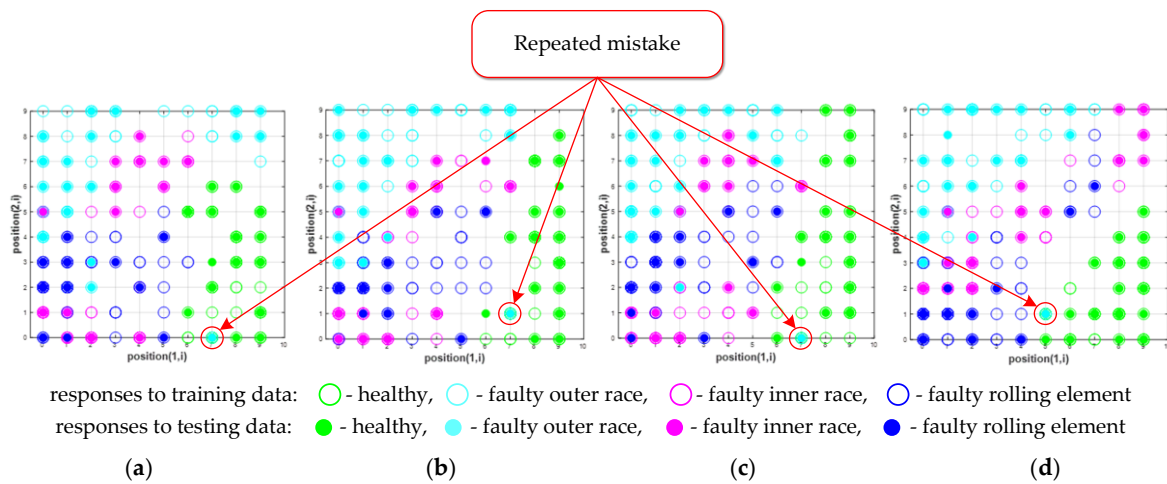


Rys. 4.8. Przebiegi wartości wyjściowych z klasyfikatora uszkodzeń (detektor typu II) dla różnych wartości rozpiętości funkcji radialnej sieci RBF na podstawie wektorów wejściowych z analiz ENV (a) lub FFT (b)

W trakcie badań sprawdzono również skuteczność sieci RBF pod kątem wpływu ograniczenia liczby neuronów w warstwie ukrytej. Analiza wykazała, że nie zawsze brak ograniczeń zapewnia lepsze dopasowanie sieci. W przypadku detektorów określających typ uszkodzonego elementu konstrukcyjnego łożyska zbyt duża liczba neuronów zmniejsza skuteczność. Sieć nadmiernie się dopasowuje, a problem staje się przewymiarowany. W przypadku danych z zastosowaniem wyłącznie FFT skuteczność spada do ok. 70%. *Optymalną wartością dla wszystkich badanych przypadków jest około 100 neuronów w warstwie ukrytej.*

Ostatnim sprawdzonym i omówionym w [H3] typem sieci neuronowych były mapy Kohonena, które ze względu na wrażliwość na dane uczące, sprawdzono dla symptomów uzyskanych z ENV, dla takiej samej liczby próbek jak poprzednio. Testy przeprowadzono dla różnych rozmiarów map, różnych typów siatki, promienia sąsiedztwa oraz funkcji odległości. Testowanie map Kohonena polegało na wygenerowaniu mapy na podstawie danych uczących, a następnie nałożeniu na nią wyników dla danych testujących. Pokrywanie się odpowiednich obszarów wskazywało poprawną detekcję. Z przeprowadzonych badań wynika, że promień sąsiedztwa o wartości 2 oraz funkcja odległości euklidesowej *dist* pozwoliły na uzyskanie lepszego uporządkowania na mapie w porównaniu do wartości 6 oraz funkcji *linkdist*.

W przypadku klasyfikacji rodzaju uszkodzenia na mapie pojawiają się splątania (rys. 4.9). Można zauważyć, że największe powiązania występują pomiędzy uszkodzeniem elementu tocznego oraz bieżni wewnętrznej. W detektorach opartych na sieciach MLP oraz RBF pojawiały się błędy właśnie przy rozróżnianiu tych uszkodzeń. Bez względu na wartość promienia sąsiedztwa, wybraną funkcję odległości oraz liczbę neuronów na mapach występuje jeden, stale powtarzający się błąd. Pomyłka pojawiała się podczas testowania informacją uzyskaną dla łożyska z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną. Również dla detektora 0-1 błąd pojawiał się w podobnym obszarze. Dla wielu badanych przypadków była to jedyna błędna odpowiedź sieci.



Rys. 4.9. Wyniki działania klasyfikatora uszkodzeń opartego na SOM dla mapy heksagonalnej 10×10 i funkcji odległości *linkdist* dla różnych wartości promienia sąsiedztwa: 2 (a), 6 (b) i dla różnych funkcji odległości: *linkdist* (c), *dist* (d) z promieniem sąsiedztwa równym 2

W przypadku map Kohonena w [H3] przedstawiono graficzną odpowiedź sieci na oba typy detektorów (detektor i klasyfikator). Rozbudowanie modułu zawierającego mapy Kohonena o dodatkowy klasyfikator (np. kaskadowo zastosowany MLP) analizujący uzyskane mapy pozwoliłby zautomatyzować proces określania rodzaju uszkodzenia. Istotną zaletą stosowania map Kohonena jest brak trudności przy doborze ich parametrów.

Zastosowanie klasycznych sieci neuronowych w diagnostyce łożysk tocznych silnika synchronicznego z magnesami trwałymi umożliwia pełną automatyzację tego procesu oraz bardzo wysoką skuteczność przy poprawnie dobranej strukturze i metodzie treningu sieci. Narzędzie to nie wymaga znajomości modelu badanego obiektu, co stanowi jego istotną zaletę.

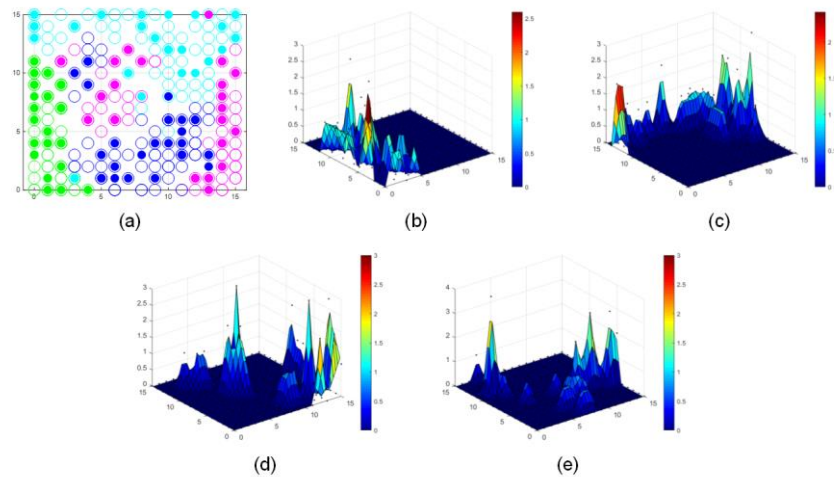
Pozytywne wyniki z działania map Kohonena omówione w [H3] skłoniły mnie do przeprowadzenia kolejnych testów, które zostały omówione w [H4]. Poprzednie badania rozszerzono o zastosowanie klasycznej transformaty Fouriera do analizy drgań mechanicznych silnika PMSM. Ponadto sprawdzono wpływ normalizacji danych wejściowych na efektywność analizowanych sieci. Dane wejściowe zostały znormalizowane do zakresu $\langle 0,1 \rangle$. Porównując wyniki z klasyfikatora dla danych opartych na FFT i ENV z danymi znormalizowanymi i danymi bez normalizacji (rys. 4.10), zauważono, że dane oparte na FFT nie spełniają wymagań systemu diagnostycznego. Niedopuszczalny jest odsetek błędów na poziomie rozpoznania stanu technicznego łożyska jako uszkodzony/nieuszkodzony. Analizując wyniki przedstawione na rys. 4.10 stwierdzono, że brak normalizacji danych wejściowych powoduje spadek efektywności klasyfikatorów opartych na mapach Kohonena, z tego powodu pozostałe analizy przedstawione w artykule zostały oparte na danych uzyskanych z ENV poddanych normalizacji.

| | | Data type | | | |
|----------|-------|--|--|--|--|
| | | FFT Data without normalization | Normalized FFT Data | ENV Data without normalization | Normalized ENV Data |
| Map size | 8x8 | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> |
| | 10x10 | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> |
| | 16x16 | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> | <p>True class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> <p>Predicted class (0 – healthy, 1 – inner race, 2 – outer race, 3 – ball)</p> |

Rys. 4.10. Macierze powiązań dla różnych rozmiarów map, promienia sąsiedztwa równego 2, funkcji odległości *dist*, dla symptomów uzyskanych z analizy FFT i ENV

W artykule [H4] przedstawiono analizę detektorów neuronowych określających łożysko jako nieuszkodzone/uszkodzone dla różnych rozmiarów map, promieni sąsiedztwa oraz funkcji odległości. W przypadku różnych funkcji odległości, podobnie jak w przypadku różnych promieni sąsiedztwa, mapy 10x10 i 16x16 osiągają porównywalną efektywność (przekraczającą 98%). Na podstawie mapy 8x8 można zauważyć, że funkcja odległości *dist* pozwala uzyskać najlepsze wyniki.

Podobne analizy wykonano dla klasyfikatora identyfikującego rodzaj uszkodzonego elementu konstrukcyjnego łożyska. Klasyfikacja uszkodzeń nie pozwoliła uzyskać tak dużej efektywności jak wykrywanie uszkodzeń, mimo to dla analogicznych parametrów uczenia osiągnięta efektywność przekracza 90%. Większość pomyłek ma miejsce podczas wykrywania uszkodzonej bieżni wewnętrznej i zewnętrznej. Najważniejszym wnioskiem jest to, że w każdym przypadku dla mapy 10x10 i 16x16 rozróżnienie łożysko sprawne/wadliwe jest wykonane prawidłowo. Za najlepsze rozwiązanie wybrano mapę 16x16 z funkcją odległości *dist* i promieniem sąsiedztwa równym 2, którą przedstawiłem w wersji 2D i 3D na rys. 4.11.



Rys. 4.11. Mapa 2D – neurony aktywowane w stanie nieuszkodzonym (●), z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej łożyska (●), uszkodzeniem bieżni zewnętrznej (●), uszkodzeniem elementu tocznego (●) (a) i odpowiednio aktywne obszary (b, c, d, e)

Mapy samoorganizujące się, z powodzeniem mogą być stosowane w diagnostyce stanu technicznego łożysk tocznych pod warunkiem zastosowania normalizacji danych wejściowych. Z przeprowadzonych i omówionych badań wynika, że analiza obwiedni jest zalecaną metodą przetwarzania sygnału przyspieszenia drgań. Większość testowanych sieci Kohonena miała skuteczność wykrywania uszkodzenia wynoszącą ok. 98% i skuteczność klasyfikacji wynoszącą ok. 93%.

Branża przemysłowa wymaga rozwiązań, które zapewnią wydajny i zautomatyzowany proces diagnostyczny. Zaproponowane sieci neuronowe mogą być łatwo zaimplementowane przy użyciu niskobudżetowej zintegrowanej platformy sprzętowej opartej np. na procesorach Arm Cortex-M lub podobnych, lub diagnostyka może być oparta na infrastrukturze pomiarowej istniejącej w przemyśle i jej rozbudowie o dodatkowe detektory neuronowe. Przykładowa koncepcja taniego systemu diagnostycznego została przedstawiona w [H6]. Na podstawie przedstawionych prac można stwierdzić, że klasyczne sieci neuronowe nadal są w stanie spełnić te wymagania i są znacznie mniej czasochłonne w uczeniu i prostsze w praktycznej implementacji niż bardziej popularne sieci głębokiego uczenia.

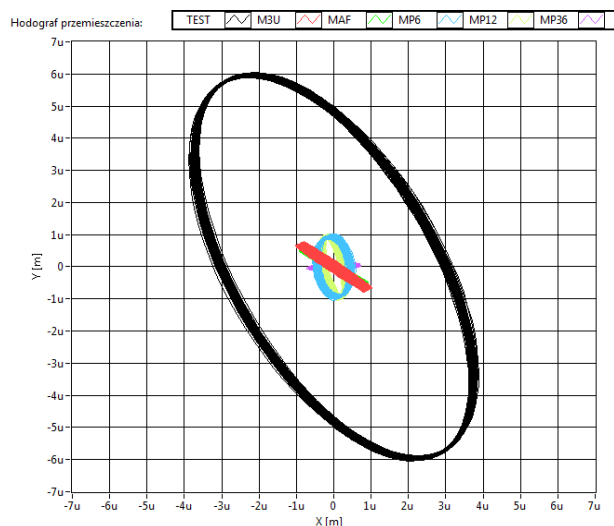
4.3 Cel nr 2 – Zastosowanie metod przetwarzania sygnałów drgań mechanicznych oraz prądu stojana do skutecznej detekcji niewyważenia wirnika w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym i PMSM [H1], [H5], [H12].

Jak już wspomniałem w uzasadnieniu wyboru tematyki badawczej niewyważenie jest zjawiskiem destrukcyjnym, które występuje nie tylko w wirnikach maszyn elektrycznych, ale również dotyczy wałów, sprzęgieł, kół samochodowych. Generowane przez niewyważony wirnik drgania przenoszone są na korpus maszyny, co przyczynia się do obniżenia niezawodności układu napędowego. Z ekonomicznego punktu widzenia niezbędne jest monitorowanie elementów wirujących pod kątem wystąpienia niewyważenia.

W [H12] przedstawiłem swoje pierwsze podejście do zagadnienia diagnostyki niewyważenia oraz wyważania wirników. W badaniach skupiłem się na zastosowaniu analizy

widmowej prądu stojana oraz drgań mechanicznych do wykrywania niewyważenia silnika indukcyjnego. Symptomami niewyważenia analizowanymi w artykule były amplitudy częstotliwości obrotowej $f_s \pm f_r$ występujące w prądzie stojana oraz amplituda częstotliwości f_r występująca w widmie drgań mechanicznych. Wzrost amplitudy charakterystycznych symptomów świadczy o wystąpieniu niewyważenia wirnika.

Samo wykrycie niewyważenia wirnika, to dopiero połowa sukcesu. Maszyna z takim uszkodzeniem powinna zostać wyłączona z eksploatacji, a jej wirnik poddany ponownemu wyważeniu. W artykule przedstawiono również opracowaną w środowisku LabView aplikację, która oprócz wykrycia niewyważenia umożliwia wyważenie wirnika jedną z trzech metod. W programie została zaimplementowana metoda trzech uruchomień, metoda amplitudowo-fazowa oraz metoda prób. Aplikacja do poprawnego działania wymaga pomiaru prądu stojana, przyspieszenia drgań mechanicznych (w dwóch osiach przesuniętych względem siebie o 90°) oraz prędkości obrotowej. Na potrzeby testów niewyważenie wirnika było modelowane za pomocą specjalnie przygotowanej tarczy zamontowanej na wale wirnika. Na rys. 4.12 przedstawiłem hodograf przemieszczenia drgań przedstawiający wyniki wyważania wirnika poszczególnymi metodami zaimplementowanymi w aplikacji.



Legenda:

TEST – silnik z niewyważonym wirnikiem

M3U – metoda trzech uruchomień

MAF – metoda amplitudowo-fazowa

MP6 – metoda prób (6 punktów pomiarowych)

MP12 – metoda prób (12 punktów pomiarowych)

MP36 – metoda prób (36 punktów pomiarowych)

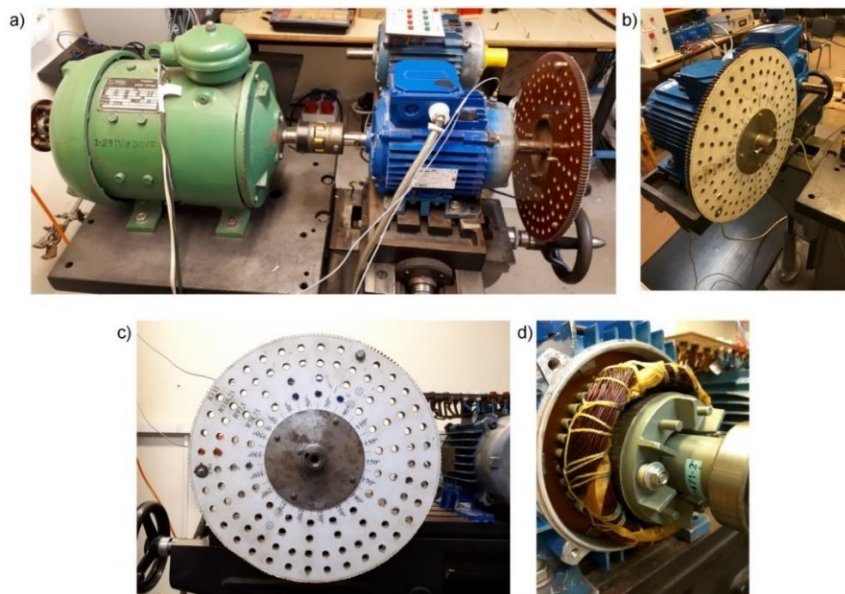
Rys. 4.12. Hodograf przemieszczenia drgań przedstawiający wyniki wyważania wirnika silnika indukcyjnego

Z rys. 4.12 wynika, że najmniejszy hodograf, a co za tym idzie najlepiej wyważony wirnik uzyskano za pomocą metody prób składającej się z 36 pomiarów. Średni poziom przemieszczenia drgań zmierzony w dwóch osiach zmniejszył się o ok. 89% względem silnika z niewyważonym wirnikiem. W metodzie trzech uruchomień obserwowane średnie zmiany przemieszczenia drgań są na poziomie ok. 80%, co i tak jest dość wysokim wynikiem. Patrząc na uzyskane wyniki pod kątem czasu jaki był potrzebny do wyważenia wirnika okazało się, że na metodę trzech uruchomień należy przeznaczyć ok. 5-7 minut, natomiast na metodę prób uwzględniającą 36 pomiarów aż 50-55 minut.

Przedstawione w artykule wyniki przeprowadzonych badań wskazują na skuteczność zastosowanych metod wykrywania niewyważenia opartych na analizie widmowej FFT prądu stojana i drgań mechanicznych. Ponadto wszystkie zastosowane metody wyważania wirników okazały się skuteczne.

W [H12] wykazałem, że analiza FFT prądu stojana oraz drgań mechanicznych jest skutecznym narzędziem do wykrywania niewyważenia wirnika silnika indukcyjnego. Wiedząc, że analiza Fouriera jest niewystarczająca w przypadku, gdy badany obiekt posiada wiele symptomów uszkodzeniowych (widmo takiego sygnału jest skomplikowane i możliwe do analizy tylko przez wykwalifikowany personel) lub sygnał jest niestacjonarny postanowiłem sprawdzić, czy transformaty wyższego rzędu sprawdzą się w diagnostyce niewyważenia.

Celem artykułu [H5] była analiza efektywności bispectrum w detekcji niewyważenia wirnika silnika indukcyjnego. Analizie poddałem prąd stojana oraz drgania mechaniczne. Z przeprowadzonej w tamtym okresie krytycznej analizy literatury wynika, że zazwyczaj badania ograniczają się do jednego obiektu, jednego źródła zasilania, stałych parametrów akwizycji danych pomiarowych oraz tylko jednej metody modelowania niewyważenia. W przygotowanym artykule rozszerzyłem dotychczasowe badania o eksperymenty zrealizowane dla dwóch silników indukcyjnych małej mocy, odpowiednio z jedną i dwiema parami biegunów zasilanych z autotransformatora lub przemiennika częstotliwości. Niewyważenie również zamodelowałem na dwa różne sposoby. Pierwszy z nich polegał na umieszczeniu masy testowej na specjalnie przygotowanej tarczy, natomiast w drugim przypadku masę testową montowałem bezpośrednio na wirniku badanego silnika. Na rys. 4.13 przedstawiłem stanowisko laboratoryjne do badania niewyważenia wirnika z przykładem modelowania niewyważenia. Do akwizycji danych pomiarowych użyłem komputer przemysłowy firmy National Instruments z kartą pomiarową PXI-4472 i specjalnie przygotowanym w środowisku LabView wirtualnym przyrządem pomiarowym.

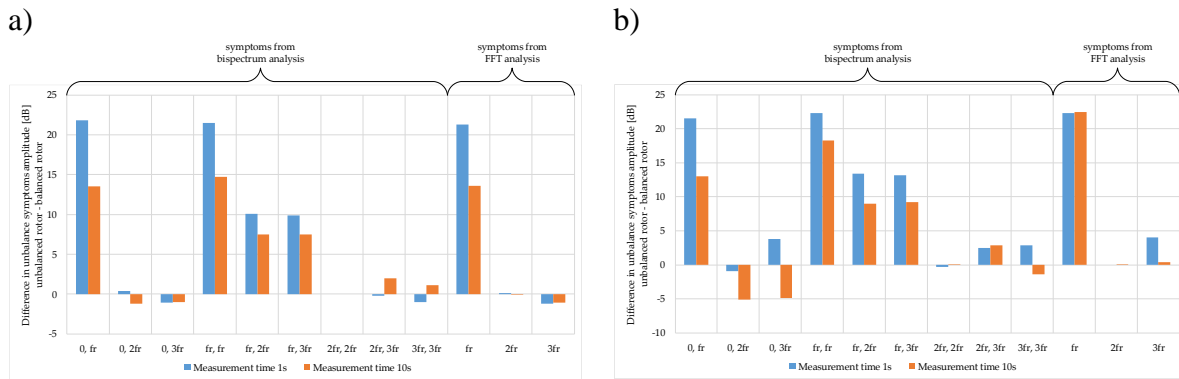


Rys. 4.13. Stanowisko do badania niewyważenia wirnika: a) silnik typu Sh90L-4 firmy INDUKTA z zamontowaną tarczą (przypadek nr 1), b) silnik typu ShR90-2S firmy BESEL z zamontowaną tarczą (przypadek nr 2), c) widok frontu tarczy do modelowania niewyważenia d) wirnik silnika typu Sh90L-4 z zamontowaną masą testową (przypadek nr 3)

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły, że analiza bispectrum jest dobrym narzędziem do wykrywania niewyważenia. Charakteryzuje się zwiększeniem ilości obserwowanych symptomów uszkodzenia w porównaniu do klasycznej analizy widmowej. Ponadto skrócenie czasu rejestracji analizowanego sygnału nie wpływa w niekorzystny sposób

na uzyskiwane z analizy bispectrum wyniki. Badania wykazały, że wystarczy jednosekundowy sygnał diagnostyczny, aby za pomocą analizy bispectrum wykryć niewyważenie wirnika. Trudności pojawiają się w przypadku szybkiej transformaty Fouriera, gdzie skrócenie czasu rejestracji prądu stojana powoduje zmniejszenie rozdzielczości widma, co niekorzystnie wpływa na postawienie prawidłowej diagnozy.

Zasilanie silnika z przemiennika częstotliwości nie ogranicza możliwości wykrywania niewyważenia wirnika. Potwierdzają to badania zarówno silnika z jedną parą biegunów jak i z dwoma parami biegunów. Niestety zmiany amplitud charakterystycznych dla niewyważenia symptomów występujących w bispectrum jak i widmie prądu stojana są małe (na poziomie ok. 1-5 dB), dlatego zalecam analizę przyspieszenia drgań mechanicznych. W tym przypadku obserwowane zmiany amplitud charakterystycznych symptomów są na poziomie ok. 10-20 dB, co pokazałem na rys. 4.14. Wydłużenie czasu rejestracji prądu stojana do 10 s nie poprawia skuteczności procesu detekcji niewyważenia wirnika. *Badania wykazały, że w analizie bispectrum drgań mechanicznych istotne dla niewyważenia wirnika są aż 4 symptomy: $(0, f_r)$, (f_r, f_r) , $(f_r, 2f_r)$ oraz $(f_r, 3f_r)$, z których największe zmiany obserwowane są dla dwóch symptomów: $(0, f_r)$, (f_r, f_r) .*



Rys. 4.14. Zestawienie wyników z analizy bispectrum oraz szybkiej transformaty Fouriera przyspieszenia drgań mechanicznych silnika z jedną parą biegunów zasilanego z przemiennika częstotliwości napięciem o częstotliwości 10 Hz (a) oraz 25 Hz (b)

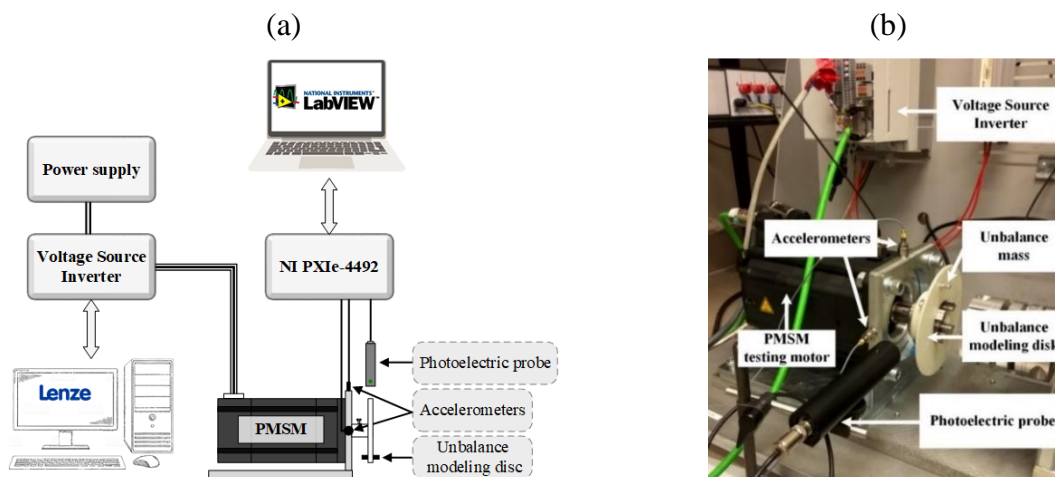
Ostatni prezentowany w [H5] przypadek dotyczył silnika z dwoma parami biegunów zasilanego z przemiennika częstotliwości ale z niewyważeniem modelowanym poprzez montowanie masy testowej bezpośrednio na wirniku. Ograniczone miejsce montażu masy testowej spowodowało zmniejszenie niewyważenia działającego na wirnik do wartości wynoszącej odpowiednio 69,6 g·mm i 193,5 g·mm. Badania przeprowadziłem dla silnika zasilanego napięciem o częstotliwościach 20 Hz, 25 Hz oraz 50 Hz, na podstawie których wykazałem, że również w tym przypadku korzystniej jest analizować sygnał przyspieszenia drgań. Niestety generowanie wyższych harmonicznych przez falownik oraz mała masa testowa powodują, że z analizy prądu stojana trudno jest jednoznacznie wybrać symptomy, które zawsze reagują na występujące niewyważenie.

Przeprowadzone badania pokazały, że niewyważenie wirnika jest możliwe do wykrycia już dla częstotliwości obrotowej wirnika f_r wynoszącej ok. 10 Hz. Ponadto sposób modelowania uszkodzenia, czyli miejsce montowania masy testowej (bezpośrednio na wirniku

lub na specjalnie przygotowanej tarczy) nie wpływa niekorzystnie na proces wykrywania niewyważenia.

Na podstawie przeprowadzonych analiz mogę stwierdzić, że sygnał przyspieszenia drgań jest lepszym nośnikiem informacji o niewyważeniu wirnika. Zmiany amplitud charakterystycznych dla niewyważenia symptomów występujących w analizie drgań mechanicznych są kilka, a w niektórych przypadkach nawet kilkanaście razy większe od tych obserwowanych w analizie prądu stojana. W związku z tym, do wykrywania niewyważenia wirnika korzystniejsze jest analizowanie sygnału drgań mechanicznych.

Udział w 19-tej międzynarodowej konferencji Power Electronics and Motion Control (PEMC2021), na której przedstawiłem referat pt. „Application of selected higher-order methods to detect rotor unbalance of drive system with PMSM” skłonił mnie do usystematyzowania analizowanych do tej pory metod przetwarzania sygnału drgań mechanicznych wykorzystywanych do wykrywania niewyważenia zarówno w silniku indukcyjnym jak i PMSM. W tym celu na stanowisku z silnikiem PMSM zamontowałem nową lżejszą tarczę, która umożliwiła przeprowadzenie bardziej rygorystycznych testów dla pięciu, dużo mniejszych mas niewyważenia: $m_1 = 1,07$ g, $m_2 = 1,39$ g, $m_3 = 1,71$ g, $m_4 = 2,05$ g, $m_5 = 2,36$ g, zamontowanych na promieniu równym 65 mm. Pozwoliło to zmniejszyć poziom niewyważenia wirnika i na nowo przetestować czułość metod diagnostycznych. W badaniach zastosowałem komputer przemysłowy firmy National Instruments z kartą pomiarową NI PXIe-4492, przy użyciu którego zrealizowałem akwizycję i przetwarzanie mierzonych sygnałów przyspieszenia drgań. Schemat układu do badania niewyważenia silnika PMSM oraz widok stanowiska badawczego przedstawiłem na rys. 4.15. Szczegółowe omówienie wyników badań dla sygnału przyspieszenia drgań i analizy FFT, bispectrum, full spectrum oraz kształtu orbity przedstawiono w [H1].



Rys. 4.15. Schemat układu do badania niewyważenia silnika PMSM (a) oraz widok stanowiska badawczego (b)

Z przeprowadzonych testów wynika, że zmiana masy testowej wywołuje liniowy wzrost amplitudy harmonicznej o częstotliwości $1f_r$ uzyskanej z analizy FFT przyspieszenia drgań mechanicznych, natomiast zmiana prędkości wywołuje w przybliżeniu wykładniczy wzrost amplitudy symptomu $1f_r$. Podobne zależności występują w przypadku analizy bispectrum dla dwóch składowych: $(0;1f_r)$ oraz $(1f_r;1f_r)$, przy czym odnotowano wyjątek dla prędkości

znamionowej, dla której charakter zmian symptomu $(0;1f_r)$ był wykładniczy. Wzrost ten widoczny jest od prędkości ok. 1000 obr/min. Amplitudy komponentów $-1X$ oraz $1X$ (precesja przeciwna i zgodna) uzyskanych z analizy full spectrum również w sposób liniowy reagują na zmianę masy testowej oraz w przybliżeniu wykładniczo na zmianę prędkości. W analizie orbity symptomem niewyważenia była wartość międzyszczytowa A_{p-p} przemieszczenia drgań mechanicznych. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały, że dla prędkości obrotowych 750 obr/min i niższych analiza kształtu orbity jest niemożliwa do wykonania. Na wykreślanych orbitach widoczne jest ich mocne zniekształcenie. Spowodowane jest to tym, że dla omawianych prędkości obrotowych wirnika zarejestrowane sygnały drgań mechanicznych charakteryzują się niską rozdzielczością oraz wysoką zawartością szumów i drgań w paśmie niskich częstotliwości.

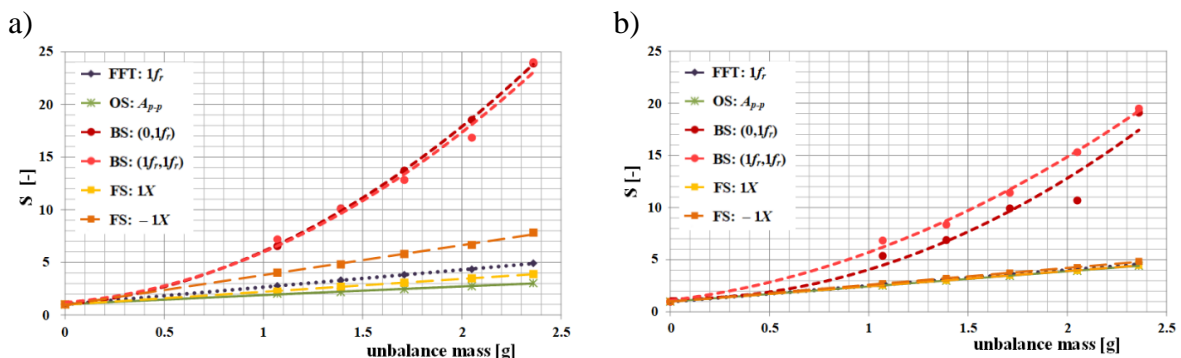
Analiza wartości międzyszczytowej A_{p-p} przemieszczenia drgań mechanicznych wykazała, że zmiana masy niewyważenia wywołuje liniowy wzrost wskaźnika A_{p-p} , przy czym zmiany te są większe dla większych prędkości obrotowych wirnika. Średnie tempo zmian symptomu A_{p-p} , względem wzrostu masy niewyważenia, wynosi 15% dla prędkości 1500 obr/min, oraz 10% dla prędkości 900 obr/min.

W celu porównania między sobą zastosowanych do wykrywania niewyważenia wirnika metod przetwarzania przyspieszenia drgań wprowadziłem współczynnik wrażliwości S , który został zdefiniowany jako stosunek amplitudy symptomu dla przypadku układu niewyważonego (odpowiednia masa dodatkowa zamontowana na tarczy) do amplitudy tego symptomu dla układu wyważonego:

$$S = \frac{A_{sU}}{A_{sB}},$$

gdzie: S – wrażliwość symptomu dla danej analizy, A_{sU} – amplituda symptomu układu niewyważonego, A_{sB} – amplituda symptomu układu niewyważonego.

Zestawienie wrażliwości symptomów w funkcji zmian masy niewyważenia dla dwóch prędkości obrotowych $n_4 = 900$ obr/min i $n_6 = 1500$ obr/min przedstawiłem na rys. 4.16. Na rysunku skróty umieszczone w legendzie oznaczają: FFT: $1f_r$ – symptom $1f_r$ z analizy FFT oraz odpowiednie symptomy z: OS – analizy kształtu orbity, BS – analizy bispectrum oraz FS – analizy full spectrum.



Rys. 4.16. Wrażliwość symptomów w funkcji zmian masy niewyważenia: prędkość $n_4 = 900$ obr/min (a); prędkość $n_6 = 1500$ obr/min (b)

Z przedstawionego zestawienia wynika, że *największą wrażliwość na zmianę niewyważenia wirnika wykazuje analiza bispectrum*, dla której można zaobserwować wzrost współczynnika S od wartości 6 do wartości 24. Co ważne, oba symptomy: $(0, f_r)$ i (f_r, f_r) wykazują podobną wrażliwość dla obu prezentowanych prędkości obrotowych. Wrażliwość symptomów pozostałych analiz jest zadowalająca. Pomimo, iż wartości symptomów A_{p-p} i $1X$ związane są z przemieszczeniem drgań mechanicznych, symptomy te wykazują wrażliwość od 2 dla masy m_1 do 5 dla masy m_5 . Należy pamiętać, że prezentowane zmiany zostały uzyskane dla bardzo małych mas testowych wynoszących od 1,07 do 2,36 grama.

Podsumowując postawiony przed sobą cel, jakim było opracowanie skutecznych metod wykrywania niewyważenia wirnika w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym i PMSM na podstawie metod przetwarzania sygnału drgań mechanicznych oraz prądu stojana, mogę stwierdzić, że *do wykrywania niewyważenia wirnika zalecanym sygnałem diagnostycznym powinny być drgania mechaniczne*. W przypadku analizy sygnałów stacjonarnych oraz możliwości wykorzystania sprzętu o dużej mocy obliczeniowej można wykorzystać zaawansowaną metodę częstotliwościową – bispectrum. Zamontowanie czujnika trójosiowego w odpowiednim miejscu na silniku pozwoli analizować jednocześnie dwa kierunki drgań mechanicznych, co da aż 4 symptomy informujące o występującym niewyważeniu (kierunek osiowy w tym przypadku nie jest analizowany). Jeśli planujemy zbudować system diagnostyczny bazujący na tanim mikrokontrolerze wówczas algorytm obliczeniowy powinien być szybki, prosty i łatwy w implementacji. Polecaną w tej sytuacji metodą może być analiza orbity. Wymaga ona jednak montażu dwóch czujników jednoosiowych na korpusie maszyny pod kątem 90° względem siebie. W sytuacji, gdy prędkość obrotowa wirnika ma ulegać ciągłym zmianom oraz analiza ma być przeprowadzana w czasie rzeczywistym, najlepszym rozwiązaniem będzie analiza rzędów – full spectrum. *Wybór najlepszej analizy do monitorowania stanu niewyważenia wirnika silnika PMSM jest uzależniony od warunków pracy układu napędowego oraz od posiadanego sprzętu. Zestawienie przedstawione w tab. 4.4 powinno być punktem wyjścia przy doborze odpowiedniej metody diagnostycznej.*

Tab. 4.4. Porównanie właściwości zastosowanych metod diagnostyki niewyważenia PMSM

| Własność | Metody analizy sygnałów | | | |
|----------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| | FFT | Bispectrum | Analiza orbity | Full Spectrum |
| Symptom | $1f_r$ | $(0, 1f_r); (1f_r, 1f_r)$ | A_{p-p} | $1X$ |
| Wrażliwość | $2,5 \div 4,5$ | $6 \div 20$ | $2,5 \div 4$ | $2,5 \div 4,5$ |
| Złożoność obliczeniowa | niska | wysoka | niska | wysoka |
| Liczba wymaganych sygnałów | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Proces | stacjonarny | stacjonarny | stacjonarny | niestacjonarny |
| Czas rejestracji sygnału | Zalecane 10 sec | 1 sec | 1 obrót wirnika | 1 obrót wirnika |
| Ograniczenia | – | – | $n > 900$ obr/min | $n > 750$ obr/min |

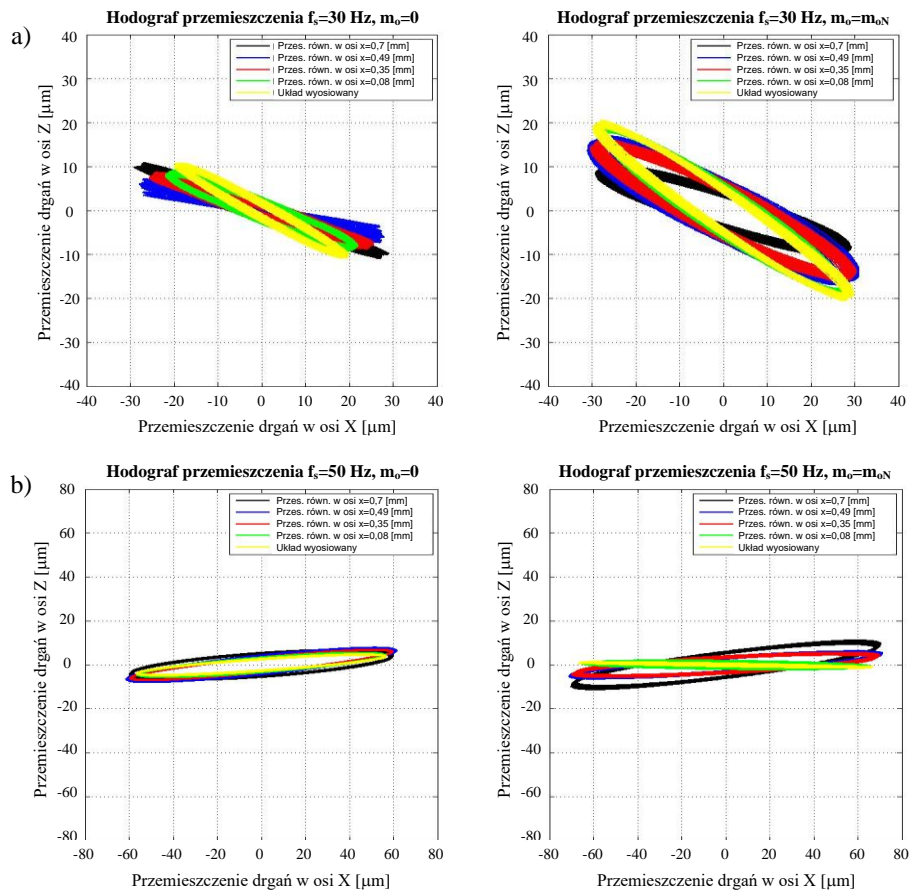
4.4 Cel nr 3 – Diagnostyka niewyosiowości i ekscentryczności wirnika silnika indukcyjnego [H8], [H10], [H11].

Niewyosiowanie układu napędowego jest jedną z podstawowych przyczyn przedwczesnych uszkodzeń silników elektrycznych. Nieprawidłowe wyosiowanie niekorzystnie wpływa na łożyska, sprzęgła, wały układu napędowego, a co za tym idzie zwiększa straty energii. Dostępne na rynku systemy pomiarowe umożliwiają osiowanie wyłączanego z eksploatacji układu napędowego, jednak problematyczne jest zdiagnozowanie układu w trakcie eksploatacji. Jedynym sposobem oceny osiowości układu jest pomiar wtórnych efektów nie zrównoważonych sił, które wówczas powstają. Sygnałami najczęściej wykorzystywanymi do wykrywania nieosiowości są drgania mechaniczne oraz prąd stojana, które odzwierciedlają wszystkie nieprawidłowe zjawiska zachodzące w maszynie a ponadto ich pomiar jest nieinwazyjny. W przemyśle sygnałem diagnostycznym informującym o stanie danego elementu (np. łożyska) lub całej maszyny jest temperatura, a mówiąc precyzyjniej jej zmiana. Do jej pomiaru wykorzystywane są kamery termowizyjne lub pirometry. Niewyosiowanie napędu jest dobrze widoczne na zdjęciach w podczerwieni. Niestety duża bezwładność cieplna maszyn elektrycznych sprawia, że pomiar temperatury nie jest idealnym sygnałem diagnostycznym.

W [H10] skupiłem się na przedstawieniu różnych metod wykrywania niewyosiowości układu napędowego z silnikiem indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości. Nieosiowość układu napędowego modelowana była na stanowisku laboratoryjnym, które umożliwiało zmianę położenia w trzech osiach współrzędnych maszyny napędzającej względem napędzanej. Do dokładnego określenia poziomu niewyosiowania wykorzystano system laserowo–optyczny OPTALIGN typu ALI 12.00. Na stanowisku mierzono prąd stojana oraz drgania mechaniczne za pomocą trzech jednoosiowych akcelerometrów piezoelektrycznych. Pomiarów wykonano przy użyciu komputera przemysłowego wyposażonego w kartę pomiarową NI PXI-4472. Aplikacja do przeprowadzenia badań została zrealizowana w środowisku LabVIEW. Wszystkie badania zostały zrealizowane przy zasilaniu z przemiennika częstotliwości pracującego w skalarnej strukturze sterowania.

Podstawową metodą diagnostyczną wykorzystaną do wykrywania nieosiowości była analiza widma drgań mechanicznych, prądu stojana oraz modułu wektora przestrzennego prądu stojana. Z przeprowadzonych badań wynika, że niewyosiowanie powoduje wzrost amplitud charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych. W widmach drgań mechanicznych jak i modułu wektora przestrzennego prądów stojana widoczny jest wzrost amplitud wielokrotności częstotliwości obrotowej. W przypadku widma prądu stojana na wzrost poziomu niewyosiowania reagują częstotliwości opisane zależnością $f_s \pm kf_r$ (gdzie k to liczba całkowita).

Wykreślenie hodografu przemieszczenia drgań mechanicznych również pozwala wykryć niewyosiowanie układu napędowego, co pokazałem na rys. 4.17.



Rys. 4.17. Wpływ równoległego przesunięcia wzdłuż osi X na kształt hodografów przemieszczenia drgań mechanicznych silnika zasilanego napięciem o częstotliwości: a) 30 Hz, b) 50 Hz

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w przypadku braku obciążenia wraz ze wzrostem przesunięcia równoległego wzdłuż osi x rośnie również amplituda drgań w tym kierunku (zmiana kształtu hodografu). Najlepiej jest to widoczne dla zasilania silnika napięciem o częstotliwości 30 Hz. W przypadku pracy silnika ze znamionowym momentem obciążenia obserwuje się również zmiany amplitudy drgań w osi Z .

W przypadku silnika nieuszkodzonego zasilanego symetrycznym napięciem hodograf prądu stojana powinien mieć kształt okręgu. Powstające w silniku uszkodzenia powodują różne zmiany kształtu hodografu. W przypadku niewspółosiowości układu napędowego, niezależnie od stopnia obciążenia silnika obserwuje się deformację trajektorii wektora prądu stojana. Można to zaobserwować charakterystycznym zwiększeniem się szerokości hodografu.

Przedstawione w [H10] termogramy pokazują, że na podstawie zdjęć z kamer termowizyjnych możliwe jest wykrycie niewspółosiowości układu napędowego. Należy jednak pamiętać, że w przypadku maszyn elektrycznych na pierwsze symptomy trzeba będzie czekać co najmniej kilkanaście minut, gdzie w przypadku analizy widmowej drgań mechanicznych czy też prądu stojana odpowiedź uzyskujemy po kilku - kilkunastu sekundach (w zależności od czasu rejestrowanego sygnału). Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zasilanie silnika z przemiennika częstotliwości ze sterowaniem skalarnym utrudnia proces monitorowania i diagnostyki niewyosiowania, jednak nie czyni go niemożliwym.

Ekscentryczność wirnika to uszkodzenie, które bardzo często powstaje w wyniku wystąpienia innej awarii mechanicznej, jak również w czasie produkcji maszyny lub w procesie montażu. Wystąpienie ekscentryczności nie musi wykluczyć maszyny z dalszej pracy. W przypadku wykrycia ekscentryczności jej poziom powinien być kontrolowany, ponieważ z reguły ma ona tendencję do pogłębiania. Niewielkie przekroczenie granic tolerancji może spowodować poważne uszkodzenie maszyny (np. tarcie wirnika o stojan, a w konsekwencji uszkodzenie stojana lub wirnika).

W artykułach [H8] i [H11] skupiłem się na metodach wykrywania ekscentryczności silnika indukcyjnego. Kontrolowany poziom ekscentryczności bardzo trudno zamodelować na obiekcie rzeczywistym, dlatego do generowania sygnału diagnostycznego jakim jest prąd stojana wykorzystałem model polowo-obwodowy silnika indukcyjnego wykonanego przy wykorzystaniu komercyjnego programu Maxwell 2D (moduł transient). Ekscentryczność była modelowana w części polowej i tak ekscentryczność statyczną uzyskałem przez przesuwanie stojana wzdłuż osi x a ekscentryczność dynamiczną przez przesuwanie wirnika wzdłuż osi x. Ekscentryczność mieszaną modelowałem poprzez jednoczesne przesuwanie stojana i wirnika. W każdym przypadku środek obrotu pozostawał w środku nieruchomego układu współrzędnych x-y.

W artykule [H11] skupiłem się na zastosowaniu analizy widmowej czterech sygnałów diagnostycznych: prądu fazowego stojana, modułu wektora przestrzennego prądu stojana, składowej kolejności zgodnej oraz przeciwnej prądu stojana. Szczegółowa analiza widm ocenianych sygnałów diagnostycznych pozwoliła wyznaczyć charakterystyczne dla ekscentryczności symptomy, które zestawilem w tab. 4.5. W tabeli pokazałem tylko częstotliwości mieszczące się w zakresach 0–150 Hz (zakres częstotliwości charakterystycznych dla ekscentryczności mieszananej) oraz 500–700 Hz (zakres częstotliwości obejmujący główną harmoniczną żłobkową PSH).

Tab. 4.5. Charakterystyczne dla ekscentryczności częstotliwości występujące w widmach: prądu fazowego stojana (I_{sA}), składowej kolejności zgodnej (I_1) i przeciwnej prądu stojana (I_2) oraz modułu wektora przestrzennego prądu stojana ($|I_s|$)

| f_e | | Analiza widmowa | | | f_e | Analiza widmowa $ I_s $ |
|--|--------------------|------------------|-----------------|------------------------|--|----------------------------|
| | | I_{sA} | I_1 | I_2 | | |
| $f_e = (kN_r \pm n_d) f_r \pm f_s n_w$ | $f_{es1}=f_{ems1}$ | $n_d=0, n_w=-1$ | $n_d=0, n_w=-1$ | $n_d=0, n_w=-1$ | $f_e = (kN_r \pm n_d) f_r \pm f_s n_w$ | $n_d=0, n_w=-1, n_p=2$ |
| | $f_{es2}=f_{ems2}$ | $n_d=0, n_w=1$ | $n_d=0, n_w=1$ | – | | $n_d=0, n_w=1, n_p=0$ |
| | $f_{ed1}=f_{emd1}$ | $n_d=2, n_w=-3$ | – | $n_d=2, n_w=-3$ | | – |
| | $f_{ed2}=f_{emd2}$ | $n_d=-2, n_w=-1$ | – | $n_d=-2, n_w=-1$ | | – |
| | $f_{ed3}=f_{emd3}$ | $n_d=2, n_w=-1$ | $n_d=2, n_w=-1$ | – | | $n_d=2, n_w=-1, n_p=2$ |
| | $f_{ed4}=f_{emd4}$ | $n_d=-2, n_w=1$ | $n_d=-2, n_w=1$ | – | | $n_d=-2, n_w=1, n_p=0$ |
| | f_{em1} | $n_d=-1, n_w=-1$ | – | $n_d=-1, n_w=-1$ | | – |
| | f_{em2} | $n_d=1, n_w=-1$ | $n_d=1, n_w=-1$ | – | | $n_d=1, n_w=-1, n_p=2$ |
| f_{em3} | $n_d=-1, n_w=1$ | $n_d=-1, n_w=1$ | – | $n_d=-1, n_w=1, n_p=0$ | | |
| $f_{em} = f_s \pm kf_r $ | f_{em4} | $k=-1$ | $k=-1$ | – | $f_{em} = kf_r$ | – |
| | f_{em5} | $k=1$ | $k=1$ | – | | $k=1$ |

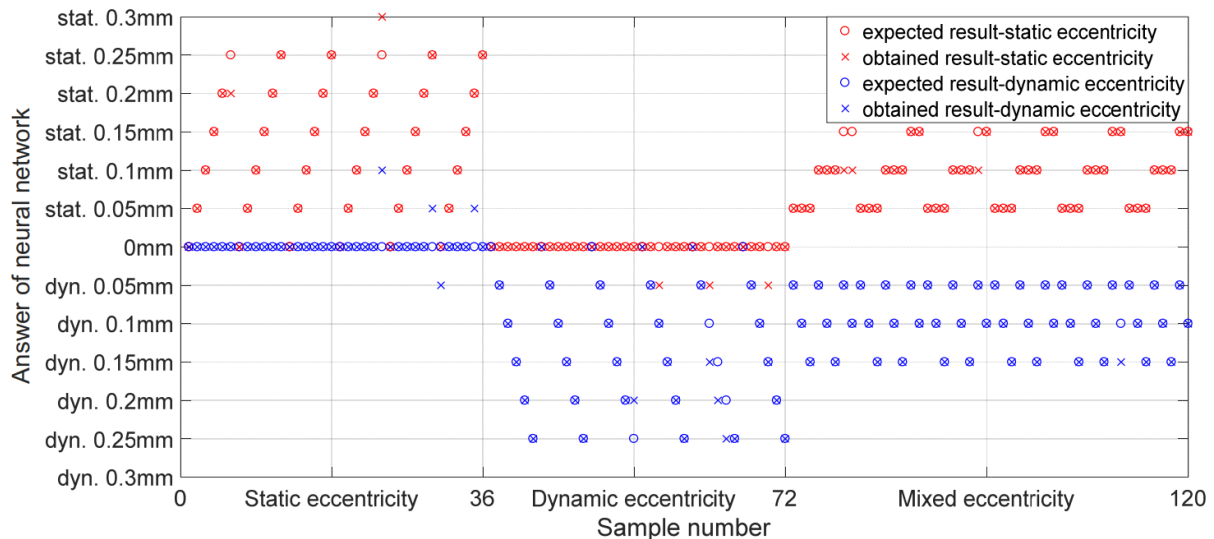
gdzie: f_s – częstotliwość sieciowa, $k = 1, 2, 3, \dots$, $n_p = 0, 2, 4, \dots$, N_r – liczba żłobków wirnika, s – poślizg, p_b – liczba par biegunów, $n_d = 1, 2, 3, \dots$ – rząd ekscentryczności dynamicznej, $n_w = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \dots$ – rząd harmonicznych czasowych stojana, f_r – częstotliwość obrotowa, f_{es1}, f_{es2} – częstotliwości charakterystyczne dla ekscentryczności statycznej; $f_{ed1} - f_{ed4}$ – częstotliwości charakterystyczne dla ekscentryczności dynamicznej; $f_{em1} - f_{em4}$ – częstotliwości charakterystyczne dla ekscentryczności mieszanej; f_{ems1}, f_{ems2} – częstotliwości charakterystyczne dla ekscentryczności mieszanej i statycznej; $f_{emd1} - f_{emd4}$ – częstotliwości charakterystyczne dla ekscentryczności mieszanej i dynamicznej.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych w artykule [H11] wykazano, że ze względu na łatwiejszy sposób ekstrakcji symptomów uszkodzenia zastosowanie modułu wektora przestrzennego może być alternatywą do analizy prądu stojana. W przypadku analizy z wykorzystaniem składowych symetrycznych prądu stojana niezbędne jest analizowanie zarówno składowej kolejności zgodnej jak i przeciwnej. Ponadto z przeprowadzonych badań wynika, że możliwe jest ciągle monitorowanie ekscentryczności silnika indukcyjnego. W związku z tym, w celu zautomatyzowania procesu detekcji postanowiłem opracować detektory neuronowe wykrywające typ ekscentryczności silnika indukcyjnego. Opracowane struktury przedstawiłem w artykule [H8].

W badaniach wykorzystałem prąd stojana uzyskany z modelu polowo-obwodowego, o którym wspominałem wcześniej. Ze względu na największą liczbę dostępnych symptomów na wejścia sieci neuronowych podałem informacje uzyskane z analizy FFT prądu stojana. Wektor wejściowy składał się z pięciu amplitud charakterystycznych dla ekscentryczności częstotliwości: $f_{es1}, f_{ed3}, f_{ed4}, f_{em4}$ i f_{em5} oraz prędkości silnika, która była konieczna ze względu na przeprowadzenie testów dla sześciu różnych wartości momentu obciążenia (nominalnego i pięciu wartości mniejszych od nominalnej). Uczenie sieci neuronowej przeprowadziłem symptomami uzyskanymi z analizy fazy A i B prądu stojana, natomiast testowanie informacjami uzyskanymi z fazy C.

W artykule przedstawiłem dwa typy sieci neuronowych: GRNN (General Regression Neural Network) oraz MLP (MultiLayer Perceptron). Zadaniem sieci GRNN było wskazanie typu ekscentryczności. Należy zaznaczyć, że pomimo braku dodatkowego skalowania danych wejściowych uzyskałem wysoką jakość detekcji ekscentryczności wynoszącą ok. 95%.

W kolejnym kroku sprawdziłem możliwość zastosowania sieci MLP z jedną i dwoma warstwami ukrytymi do wykrywania typu ekscentryczności. W celu uzyskania podobnych zakresów na wejściach sieci neuronowej, wartość prędkości musiałem podzielić przez 10^7 . W celu uśrednienia wyników wykonałem 30 serii uczenia i testowania. Z przeprowadzonych testów wynika, że średnia skuteczność detekcji ekscentryczności sieci neuronowych z jedną warstwą ukrytą wynosi ok. 82–93% w zależności od liczby neuronów. Zwiększenie liczby warstw ukrytych tylko o kilka procent poprawia efektywność detekcji. Zastosowanie dwóch neuronów w warstwie wyjściowej (jeden informuje o stopniu ekscentryczności statycznej a drugi dynamicznej) nie poprawia średniej efektywności detektorów neuronowych, która wynosiła około 80%. Na rys. 4.18 przedstawiłem wynik testowania przykładowego detektora neuronowego z dwoma neuronami wyjściowymi.



Rys. 4.18. Przykładowy wynik testowania sieci neuronowej o strukturze 6-7-5-2

Na podstawie przeprowadzonych badań mogę stwierdzić, że sieci GRNN mogą być alternatywą dla klasycznych sieci MLP. Ich zaletą jest uproszczony proces projektowania, podczas którego wymagane jest podjęcie decyzji jedynie o wartości parametru rozproszenia funkcji aktywacji. W trakcie badań uzyskałem bardzo dobre wyniki klasyfikacji uszkodzeń. Ponadto dodatkowymi zaletami proponowanych detektorów jest możliwość detekcji rodzaju i poziomu ekscentryczności.

4.5 Określenie wkładu autora w rozwój dyscypliny.

Omówiony cykl publikacji przedstawia wyniki badań naukowych dotyczących skutecznych metod przetwarzania sygnałów wykorzystywanych w diagnostyce uszkodzeń łożysk tocznych, niewyważenia wirnika, niewspółosiowości oraz ekscentryczności układów napędowych z silnikiem indukcyjnym, PM BLDC oraz PMSM. Badania zrealizowałem (w zależności od zastosowanego napędu) przy zasilaniu z sieci jak i z przekształtnika w układzie sterowania skalarne i wektorowe, a w przypadku ekscentryczności na drodze symulacyjnej. Ze względu na ciągły rozwój przemysłu oraz coraz częstsze stosowanie silników z magnesami trwałymi w opracowanych artykułach nie pominąłem również układów napędowych wyposażonych w tego typu silniki.

Jak wykazały badania oraz własne doświadczenia, skuteczność omawianych metod diagnostycznych zależy zarówno od analizowanego sygnału diagnostycznego, czy też prędkości obrotowej. Dlatego budowanie uniwersalnych systemów diagnostycznych powinno być poprzedzone licznymi badaniami eksperymentalnymi, dzięki którym możliwe jest sprawdzenie różnych sygnałów diagnostycznych oraz metod ich przetwarzania. Rozbudowanie tego typu systemów o sieci neuronowe powinno zautomatyzować jak również przyspieszyć proces detekcji uszkodzeń. Wszystkie z zaprezentowanych przeze mnie metod przetwarzania sygnałów, sieci neuronowych czy też opracowanych w środowisku LabView systemów diagnostycznych zostały z powodzeniem przetestowane w warunkach laboratoryjnych na układach napędowych z silnikami małej mocy (do 3 kW). Dzięki temu możliwe było dokonanie oceny praktycznej przydatności zaproponowanych rozwiązań.

Na podstawie omówienia dokonań autora, przedstawionych w cyklu powiązanych tematycznie publikacji, można sformułować wykaz osiągnięć naukowych wpisujących się w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne:

- opracowanie skutecznych metod diagnostyki łożysk tocznych silnika indukcyjnego, bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi (PM BLDC) oraz silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM) przy wykorzystaniu sygnału drgań mechanicznych;
- opracowanie skutecznych metod diagnostyki niewyważenia wirnika silnika indukcyjnego i PMSM przy wykorzystaniu sygnału prądu stojana i drgań mechanicznych;
- opracowanie skutecznych metod detekcji niewspółosiowości układu napędowego z silnikiem indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości przy wykorzystaniu sygnału prądu stojana i drgań mechanicznych;
- opracowanie skutecznych metod detekcji ekscentryczności silnika indukcyjnego na podstawie analizy prądu stojana uzyskanego z modelu połowo-obwodowego;
- analiza możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych do wykrywania i klasyfikacji typu uszkodzonego elementu konstrukcyjnego łożyska tocznego oraz typu i poziomu ekscentryczności;
- opracowanie i weryfikacji różnych typów płytkich sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych silnika PMSM pracującego w różnych warunkach zasilania i obciążenia;
- opracowanie prototypowej wersji uniwersalnego neuronowego detektora uszkodzeń łożysk tocznych umożliwiającego detekcję dla różnych łożysk tocznych zamontowanych w różnych silnikach (detektor zaprezentowany na III konferencji naukowo–technicznej Energooszczędne Napędy Przekształtnikowe w Przemysle ENPP 2018);
- opracowanie w środowisku LabView niskobudżetowego komputerowego systemu do monitorowania i diagnostyki uszkodzeń łożysk tocznych silnika indukcyjnego wyposażonego w sieć neuronową i pracującego zarówno w trybie on-line jak i off-line;
- opracowanie w środowisku LabView dodatkowych modułów rozszerzających możliwości opracowanego systemu do monitorowania i diagnostyki łożysk tocznych;
- opracowanie w środowisku LabView aplikacji umożliwiającej wykrywanie niewyważenia oraz wyważanie wirnika silnika indukcyjnego.

Omówiony cykl powiązanych tematycznie artykułów oraz przedstawione powyżej osiągnięcia naukowe nie wyczerpują w pełni tematyki związanej z diagnostyką uszkodzeń układów napędowych z silnikami elektrycznymi. Wiele z nich może być przedmiotem dalszych prac badawczych. Aktualnie prowadzę lub w przyszłości będę prowadzić badania dotyczące między innymi:

- poszukiwania nowych metod diagnostycznych skutecznych w wykrywaniu niewyważenia wirnika w układzie dwumasowym z silnikami PMSM. Jest to zagadnienie naukowe, które było przeze mnie analizowane na zrealizowanym na Politechnice Poznańskiej stażu naukowym. Dnia 28.09.2023 roku do czasopisma *AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKŁÓCENIA* (od 17.07.2023 na liście czasopism naukowych MEiN (identyfikator 201255) – 200 pkt.) został wysłany artykuł pt.

„*Application of the STFT for detection of the unbalance of a drive system with an elastic interconnection*”, omawiający uzyskane wyniki badań laboratoryjnych. Szeroki zakres zrealizowanego stażu pozwoli przygotować kolejne prace naukowe. Planowane jest również opracowanie metod diagnostycznych bazujących na sygnałach ze struktury sterowania. Ponadto planowane są dalsze wspólne badania w tym przygotowanie wniosku finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

- Opracowania skutecznych metod diagnostyki uszkodzeń mechanicznych układów napędowych zamontowanych w samolocie. Powyższe badania będą realizowane w ramach Europejskiego projektu budowy samolotu o napędzie hybrydowo-elektrycznym HECATE (Hybrid-ElectriC regional Aircraft distribution Technologies), w którym jestem jednym z wykonawców.
- Opracowania nowych metod oceny stanu technicznego maszyn elektrycznych przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji w tym zastosowania hybrydowych sieci neuronowych, o których wspomniałem w [H3] oraz metod głębokiego uczenia. W pracach chciałbym się skupić na opracowaniu uniwersalnego detektora uszkodzeń mechanicznych.

4.6 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.

Dominującym zagadnieniem poruszanych przeze mnie prac naukowo-badawczych były uszkodzenia mechaniczne, ze szczególnym uwzględnieniem uszkodzeń łożysk tocznych, niewyważenia wirnika, niewspółosiowości oraz ekscentryczności silników elektrycznych. Szczegóły dotyczące tej tematyki zostały omówione w poprzednich punktach niniejszego wniosku habilitacyjnego. Poza zaprezentowanymi badaniami, moja uwaga skupiła się również na wykrywaniu uszkodzeń stojana i wirnika silnika indukcyjnego, modelowaniu uszkodzeń silnika indukcyjnego w programie Ansoft Maxwell Circuit Editor oraz opracowaniu w środowisku LabView komputerowego systemu pomiarowego do diagnostyki uzwojeń stojana silnika indukcyjnego. Ponieważ osiągnięcia te nie zostały uwzględnione w cyklu publikacji powiązanych tematycznie, stanowiących jeden z warunków ubiegania się o stopień doktora habilitowanego i nie zostały załączone do dokumentacji, wybrane prace omówiłem w tym punkcie.

4.6.1 Diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana i klatki wirnika silnika indukcyjnego.

[D1] **Paweł G. Ewert**, *Use of axial flux in the detection of electrical faults in induction motors*. W: 2017 International Symposium on Electrical Machines: Nałęczów, Poland, 18-21 June 2017. [Danvers, MA: IEEE, 2017]. s. 1-6.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ISEM.2017.7993571>.

Punktacja MEiN: 15.

[D2] **Paweł G. Ewert**, *Application of neural networks and axial flux for the detection of stator and rotor faults of an induction motor*. Power Electronics and Drives. 2019, vol. 4, nr 1, s. 203–215.

DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/pead-2019-0001>.

Punktacja MEiN z 2019-2023: 20.

Poza głównym cyklem omówionym w niniejszym wniosku, zająłem się również analizą wykrywania uszkodzeń uzwojeń stojana oraz klatki wirnika na podstawie analizy strumienia

poosiowego. Uszkodzenia te należą do grupy uszkodzeń elektrycznych. Uszkodzenia uzwojeń stojana obejmują ok. 36–66% wszystkich awarii, natomiast uszkodzenia klatki wirnika to ok. 9–13% wszystkich awarii^{29, 30}. Jeśli np. uszkodzenie stojana uda się wykryć zanim zadziałają zabezpieczenia zwarciove, to możliwe jest wyłączenie maszyny z eksploatacji, zaplanowanie remontu i w rezultacie ograniczenie kosztów związanych z naprawą. Najczęściej stosowane metody diagnostyczne do wykrywania uszkodzeń stojana i wirnika bazują na analizie prądów stojana. Ja w swoich artykułach [D1] i [D2] do detekcji omawianych uszkodzeń zastosowałem analizę widmową napięcia indukowanego w cewce pomiarowej przez strumień poosiowy. Strumień poosiowy w idealnej maszynie elektrycznej powinien wynosić zero. W rzeczywistych silnikach taka sytuacja nigdy nie wystąpi, ponieważ zawsze są pewne asymetrie w obwodzie wirnika i stojana.

W artykule [D1] badany silnik indukcyjny małej mocy zasilany był bezpośrednio z sieci. Specjalnie wykonana konstrukcja silnika pozwoliła na przeprowadzenie kontrolowanego zwarcia wybranej liczby zwojów w każdej fazie stojana. W artykule przedstawiłem wyniki uzyskane dla zwarcia maksymalnie 8 zwojów w fazie A. Badania wykonałem bez ograniczania prądu płynącego w pętli zwarciovej. Uszkodzenie wirnika zostało zamodelowane poprzez fizyczne rozwiercenie wybranych prętów klatki wirnika oraz pierścienia zwierającego. W celu uniknięcia powstania niewyważenia, otwory po wykonanych odwiertach zostały wypełnione mieszanką żywic. W artykule przedstawiłem wyniki dla maksymalnie 8 uszkodzonych prętów oraz pierścienia zwierającego. Do pomiarów użyłem cewki pomiarowej zawierającej 600 zwojów wykonanych z drutu o średnicy 0,7 mm². Do akwizycji danych pomiarowych wykorzystałem komputer PC z kartą pomiarową NI USB-9234 i aplikacją wykonaną w środowisku LabView.

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych wykazałem, że *analiza napięcia indukowanego przez strumień poosiowy pozwala wykryć uszkodzenia elektryczne silnika indukcyjnego. Analiza widmowa umożliwia wykrycie i zidentyfikowanie zarówno zwarc zwojowych, jak i uszkodzeń klatki wirnika.* Dodatkowym źródłem informacji o stanie silnika indukcyjnego jest wartość skuteczna indukowanego w cewce pomiarowej napięcia. Szeroki zakres przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazał, że w celu uzyskania właściwej diagnozy niezbędne jest posiadanie informacji o rzeczywistej prędkości silnika, co pokazałem na rys. 4.19 i rys. 4.20.

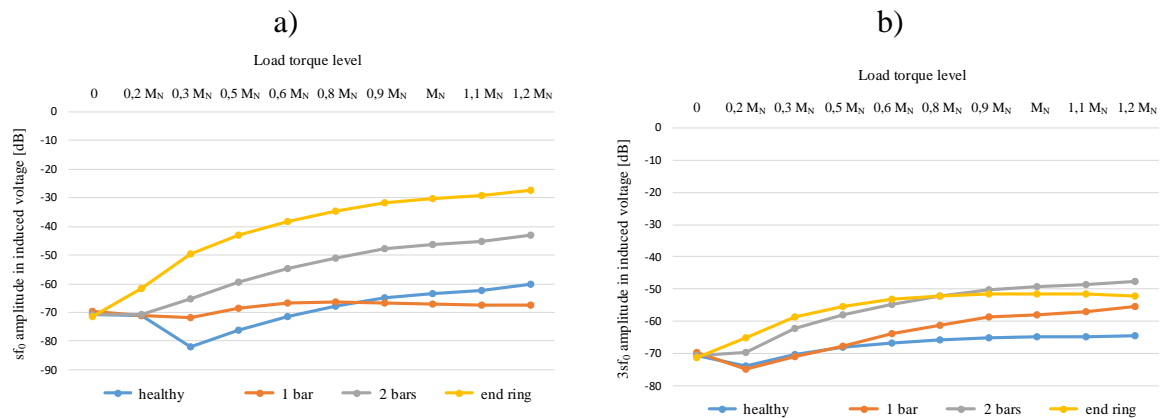
Badania wykazały, że symptom sf_0 (gdzie f_0 to częstotliwość napięcia zasilającego) jest skuteczny w wykrywaniu uszkodzeń klatki wirnika gdy obciążenie silnika wynosi tylko $0,3M_N$. Ponadto wykrycie uszkodzonego wirnika jest możliwe od dwóch uszkodzonych prętów. Badania również wykazały przydatność symptomu $3sf_0$ w diagnostyce klatki wirnika (rys. 4.19b). W tym przypadku już od obciążenia wynoszącego $0,2M_N$ można wykryć dwa uszkodzone pręty klatki wirnika.

W momencie wystąpienia zwarcia w uzwojeniu stojana, w widmie napięcia indukowanego w cewce pomiarowej można zaobserwować zmianę licznych harmonicznych.

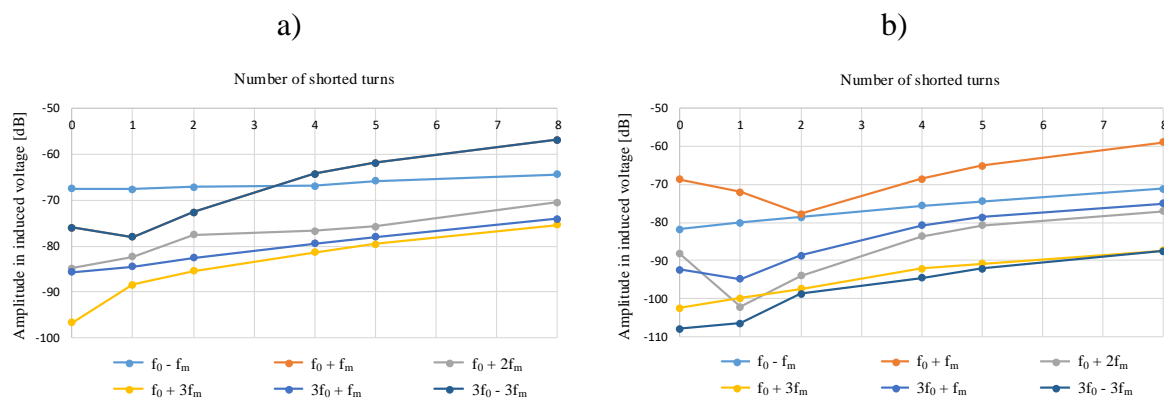
²⁹ P. O'Donnell, Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations: Part I–II, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA, 21, no. 4, pp. 853–872, Jul. 1985.

³⁰ J. He, C. Somogyi, A. Strandt, and N. A. O. Demerdash, Diagnosis of stator winding short-circuit faults in an interior permanent magnet synchronous machine, in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), Sep. 2014, pp. 3125–3130.

Na rys. 4.20 przedstawiłem zestawienie tych, których wzrost amplitudy odwzorowuje liczbę zwartych zwojów. W zależności od wybranego symptomu możliwe jest wykrycie uszkodzenia stojana już od jednego zwartego zwoju. W przypadku silnika nieobciążonego częstotliwości f_0+f_m i $3f_0-3f_m$ przyjmują te same wartości (gdzie f_m to częstotliwość obrotowa).



Rys. 4.19. Wpływ momentu obciążenia na amplitudę harmonicznej sf_0 (a) i $3sf_0$ (b) informującej o uszkodzeniu klatki wirnika



Rys. 4.20. Zestawienie wybranych amplitud charakterystycznych dla uszkodzenia stojana częstotliwości w funkcji liczby zwartych zwojów silnika: a) bez obciążenia, b) obciążonego znamionowo

Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych omówiłem również na międzynarodowej konferencji International Symposium on Electrical Machines (SME2017).

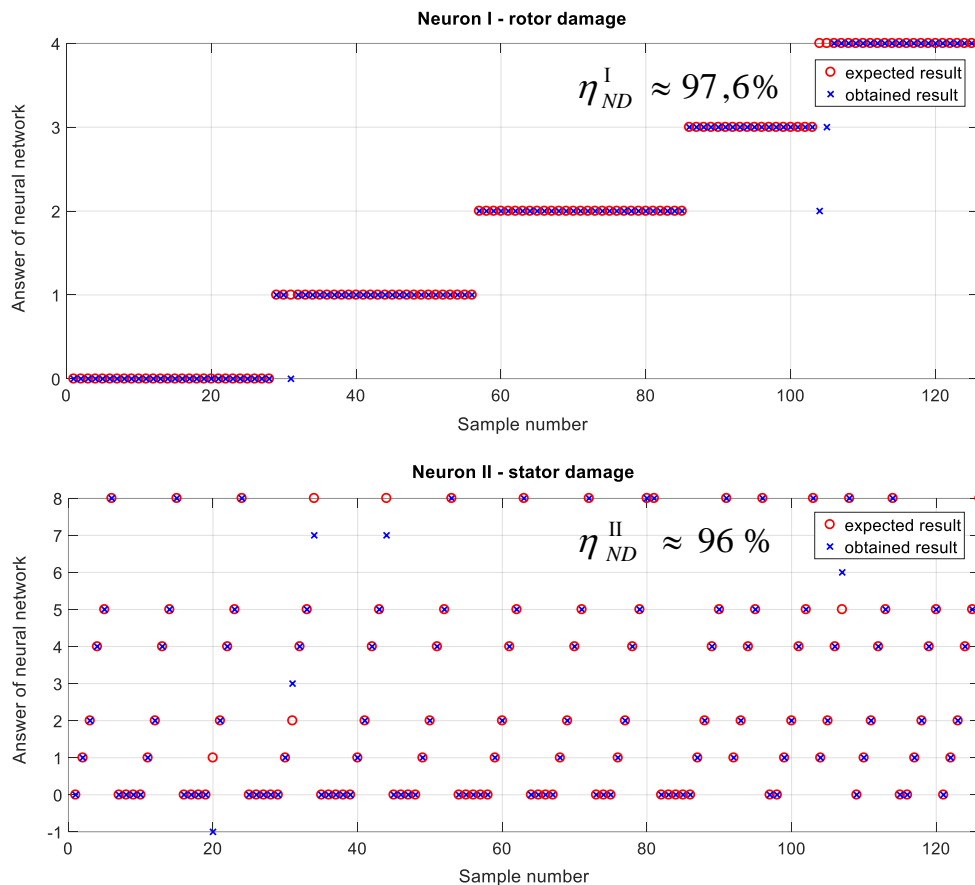
Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych mogę stwierdzić, że zastosowanie cewki pomiarowej do pomiaru strumienia poosiowego jest niedrogim i skutecznym narzędzie w diagnostyce uszkodzeń stojana i wirnika silnika indukcyjnego. Dyskusja podczas konferencji oraz otrzymane wyniki skłoniły mnie do opracowania detektorów neuronowych umożliwiających wykrycie i identyfikację stopnia uszkodzenia stojana i wirnika silnika indukcyjnego. Opracowane w środowisku MATLAB-Simulink sieci neuronowe omówiłem w artykule [D2]. W artykule przedstawiłem cztery warianty różnych sieci MLP: z jednym neuronem wyjściowym wykrywającym stan silnika (uszkodzony/nieuszkodzony) lub, który element jest uszkodzony (nieuszkodzony, uszkodzony stojan, wirnik lub oba) oraz z dwoma neuronami wyjściowymi określającymi, który element

jest uszkodzony lub w jakim stopniu stojan i/lub wirnik jest/są uszkodzone. Na wejścia sieci neuronowych podałem poślizg, wartość RMS napięcia indukowanego w cewce pomiarowej oraz amplitudy sześciu charakterystycznych dla uszkodzonego wirnika (sf_0 i $3sf_0$) i stojana (f_0+2f_m , f_0+3f_m , $3f_0+f_m$ i $3f_0-3f_m$) symptomów. Podczas badań eksperymentalnych przeprowadziłem 327 pomiarów, z których uzyskane symptomy podzieliłem na dwa wektory: wektor uczący (201 pomiarów) i wektor testowy (126 pomiarów). W celu uśrednienia wydajności testowanych struktur sieci neuronowych przeprowadziłem 30 serii uczenia i testowania. W procesie uczenia zastosowałem metodę Levenberga-Marquardta.

Detektory z jednym neuronem wyjściowym i jedną warstwą ukrytą określające czy silnik jest nieuszkodzony lub uszkodzony charakteryzowały się bardzo wysoką średnią skutecznością wynoszącą ponad 96%. Sieci neuronowe z jedną warstwą ukrytą i jednym neuronem wyjściowym wykrywające rodzaj uszkodzenia charakteryzowały się średnią skutecznością od 74% do 86,8%. Zastosowanie detektorów neuronowych z dwiema warstwami ukrytymi poprawia średni wskaźnik wykrywalności tylko o kilka procent.

Zastosowanie sieci neuronowych z dwoma neuronami wyjściowymi, gdzie neuron I informuje o uszkodzeniu wirnika na neuron II o uszkodzeniu stojana zwiększyło skuteczność detekcji. Badania wykazały, że neuron II uzyskał o kilka procent wyższą średnią skuteczność w porównaniu do neuronu I. W przypadku obu neuronów średnia skuteczność z przeprowadzonych 30 testów oscyluje wokół 93-98%. Średnia wydajność całej sieci neuronowej jest również wysoka i przekracza 90%.

Sprawdziłem również możliwość zastosowania sieci neuronowej z dwoma neuronami wyjściowymi określającej nie tylko, który element jest uszkodzony ale też w jakim stopniu jest uszkodzony. Z przeprowadzonych licznych testów wynika, że do uzyskania średniej skuteczności wykrywania rodzaju i stopnia uszkodzenia na poziomie ponad 80% wymagana jest sieć neuronowa z co najmniej 9 neuronami w jednej warstwie ukrytej. Zastosowanie sieci neuronowych z dwiema warstwami ukrytymi nie poprawia skuteczności detekcji i oceny stopnia uszkodzenia stojana i wirnika. Na rys. 4.21 przedstawiłem przykładowe wyniki testowania sieci neuronowej o strukturze 8-15-2. Przedstawiona na rysunku sieć neuronowa ma bardzo wysoką efektywność wynoszącą około 94%. Skuteczność poszczególnych neuronów wyjściowych jest również wysoka, około 97,6% dla neuronu I i około 96% dla neuronu II.



Rys. 4.21. Przykładowe wyniki testów sieci neuronowej o strukturze 8-15-2 ($\eta_{ND}^{I-II} \approx 94,4\%$)

Omówione w [D2] wyniki badań pokazują, że stosunkowo proste sieci neuronowe oparte na MLP z jedną warstwą ukrytą, po odpowiedniej procedurze uczenia można skutecznie zastosować do różnych zadań diagnostycznych, np. wykrywania uszkodzenia silnika, wykrywania uszkodzenia stojana lub wirnika, wykrywania stopnia uszkodzenia stojana (liczba zwartych zwojów) lub wirnika (liczba pękniętych prętów).

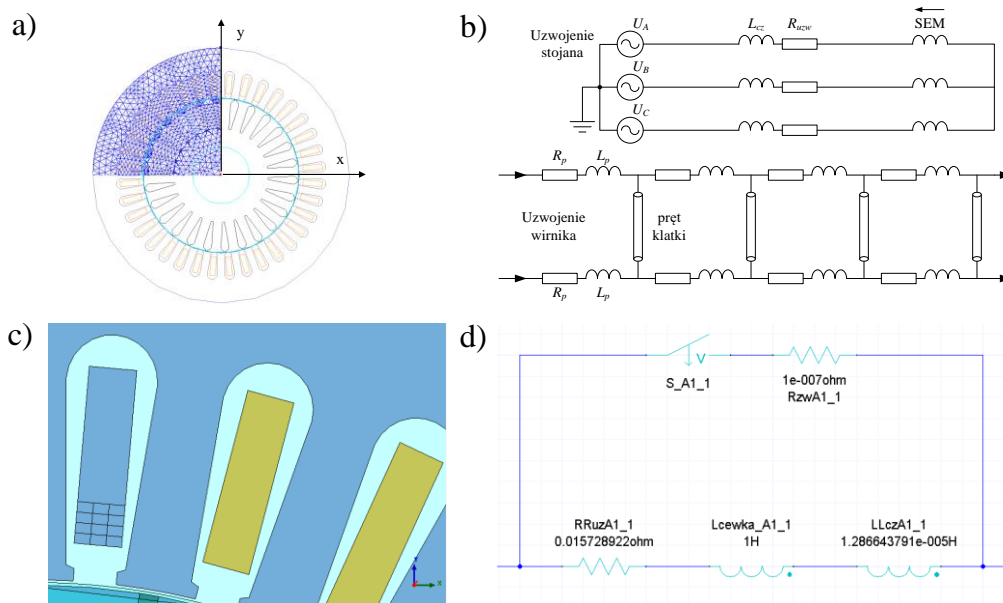
4.6.2 Modelowanie uszkodzeń silnika indukcyjnego w programie Ansoft Maxwell Circuit Editor.

[D3] **Paweł G. Ewert (40%)**, Czesław T. Kowalski (20%), Marcin Wolkiewicz (40%), *Model polowo-obwodowy silnika indukcyjnego ze zwarciami zwojowymi (ang. Field-circuit mathematical model of the induction motor with shorted turns in the stator winding)*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2013, nr 33, s. 194-206.

Punktacja MEiN z 2013-2018: 6.

Mój wkład w przygotowanie artykułu polegał na zaproponowaniu koncepcji artykułu, współudziale w opracowaniu modelu symulacyjnego polowo-obwodowego silnika z uszkodzonym uzwojeniem stojana, opracowaniu wyników badań symulacyjnych i współredakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

Modelowaniem ekscentryczności silnika indukcyjnego zajmowałem się w trakcie realizowania pracy doktorskiej. Model polowo-obwodowy silnika indukcyjnego z ekscentrycznością statyczną, dynamiczną oraz mieszaną został szczegółowo opisany w rozprawie doktorskiej oraz przywołany w kilku artykułach, np. w [H11] i [H8]. W trakcie prac finansowanych ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu N N510 637340 wykonałem model polowo-obwodowy silnika indukcyjnego umożliwiający symulację zwarć zwojowych w stojanie. W [D3] omówiłem podstawowy model polowo-obwodowy silnika indukcyjnego oraz jego rozbudowę o część elektryczną, która została wykonana w programie Ansoft Maxwell Circuit Editor. Opracowany model umożliwia symulowanie do 12 zwartych zwojów w każdej fazie. Geometrię modelu polowo-obwodowego, schemat części obwodowej oraz obwód zwarcia pierwszego zwoju, pierwszej cewki w fazie A przedstawiłem na rys. 4.22.



Rys. 4.22. Model polowo-obwodowy silnika indukcyjnego umożliwiający modelowanie zwarć zwojowych: a) geometria podstawowego modelu polowo-obwodowego wraz z fragmentem siatki dyskretyzacyjnej, b) schemat części obwodowej podstawowego modelu, c) przykład żłobka stojana podzielonego na pojedyncze zwoje, d) obwód zwarcia pierwszego zwoju, pierwszej cewki w fazie A

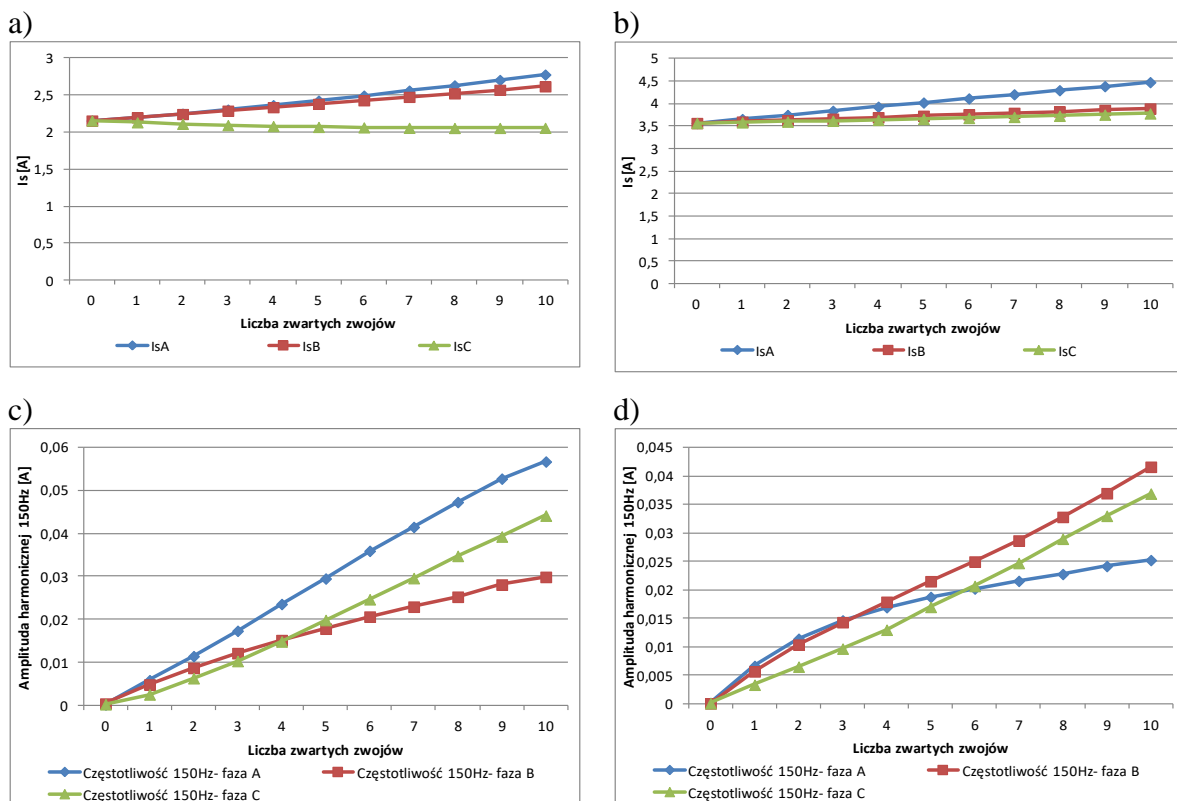
W skład obwodu zwarcia przygotowanego modelu wchodził stycznik (S_A1_1) oraz rezystor (RzwA1_1) odpowiadający rezystancji punktu zwarcia. Jeden zwoj reprezentowany był przez rezystancję zwoju (RRuzA1_1) i indukcyjność połączenia czołowego (LLczA1_1) oraz cewkę (Lcewka_A1_1), której wartość wyznaczana jest w części polowej.

W [D3] przedstawiłem również wyniki badań symulacyjnych oraz weryfikację eksperymentalną opracowanego modelu. W ramach badań symulacyjnych zwierano od 1 do 10 zwojów. Każde symulowane zwarcie trwało 2 sekundy. Całkowity czas symulacji dla jednej fazy trwał 22,2 sekundy.

Weryfikacja eksperymentalna wykazała, że wyniki uzyskane z modelu polowo-obwodowego zbliżone są do wyników uzyskiwanych na obiekcie rzeczywistym. Przebiegi mają

zbliżony do siebie kształt oraz amplitudy. Zaobserwowane różnice wartości skutecznej prądu stojana uzyskiwanego z pomiarów i symulacji są na poziomie ok. 5%. Jest to niewielka rozbieżność, która może wynikać z zastosowania różnych materiałów do konstrukcji stojana (przyjętych blach) w modelu polowo-obwodowym w porównaniu do tych użytych w rzeczywistym silniku. Ponadto zamodelowany silnik zasilany był napięciem idealnie sinusoidalnym, podczas gdy rzeczywisty silnik zasilano napięciem z sieci zawierającym wyższe harmoniczne i posiadającym pewną asymetrię. Różny krok próbkowania również mógł wpłynąć na uzyskane wyniki.

Na podstawie analizy widmowej prądów fazowych, modułu wektora przestrzennego prądu oraz hodografów prądu stojana stwierdzono, że otrzymane na drodze symulacyjnej prądy fazowe zawierają wszystkie symptomy charakteryzujące zwarcia zwojowe. *Analiza wartości skutecznej prądów fazowych oraz harmonicznej $3f_s$ pozwala określić fazę, w której wystąpiło zwarcie. Ponadto możliwe jest również określenie liczby zwartych zwojów, co potwierdzają wyniki przedstawione na rys. 4.23.*



Rys. 4.23. Zestawienie wartości skutecznej prądów fazowych (a i b) oraz amplitudy harmonicznej 150Hz (c i d) od liczby zwartych zwojów w fazie A dla silnika nieobciążonego (a i c) oraz obciążonego znamionowo (b i d)

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych mogę stwierdzić, że *model polowo-obwodowy jest dobrym źródłem do generowania wzorców diagnostycznych zwarc zwojowych*. Dzięki niemu możliwe jest symulowanie różnych poziomów zwarc zwojowych w różnych fazach. Jego zaletą jest duża zbieżność z rzeczywistym silnikiem, natomiast wadą bardzo długi czas obliczeń.

4.6.3 Komputerowe systemy diagnostyczne.

- [D4] **Paweł G. Ewert (40%)**, Marcin Wolkiewicz (40%), Czesław T. Kowalski (20%), *Komputerowy system do monitorowania stanu uzwojeń stojana silnika indukcyjnego (ang. Computer system for monitoring of induction motor stator windings)*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2013, nr 100, s. 151-156.

Lokalizacja elektroniczna:

http://www.komel.katowice.pl/ZRODLA/FULL/100a/ref_28.pdf.

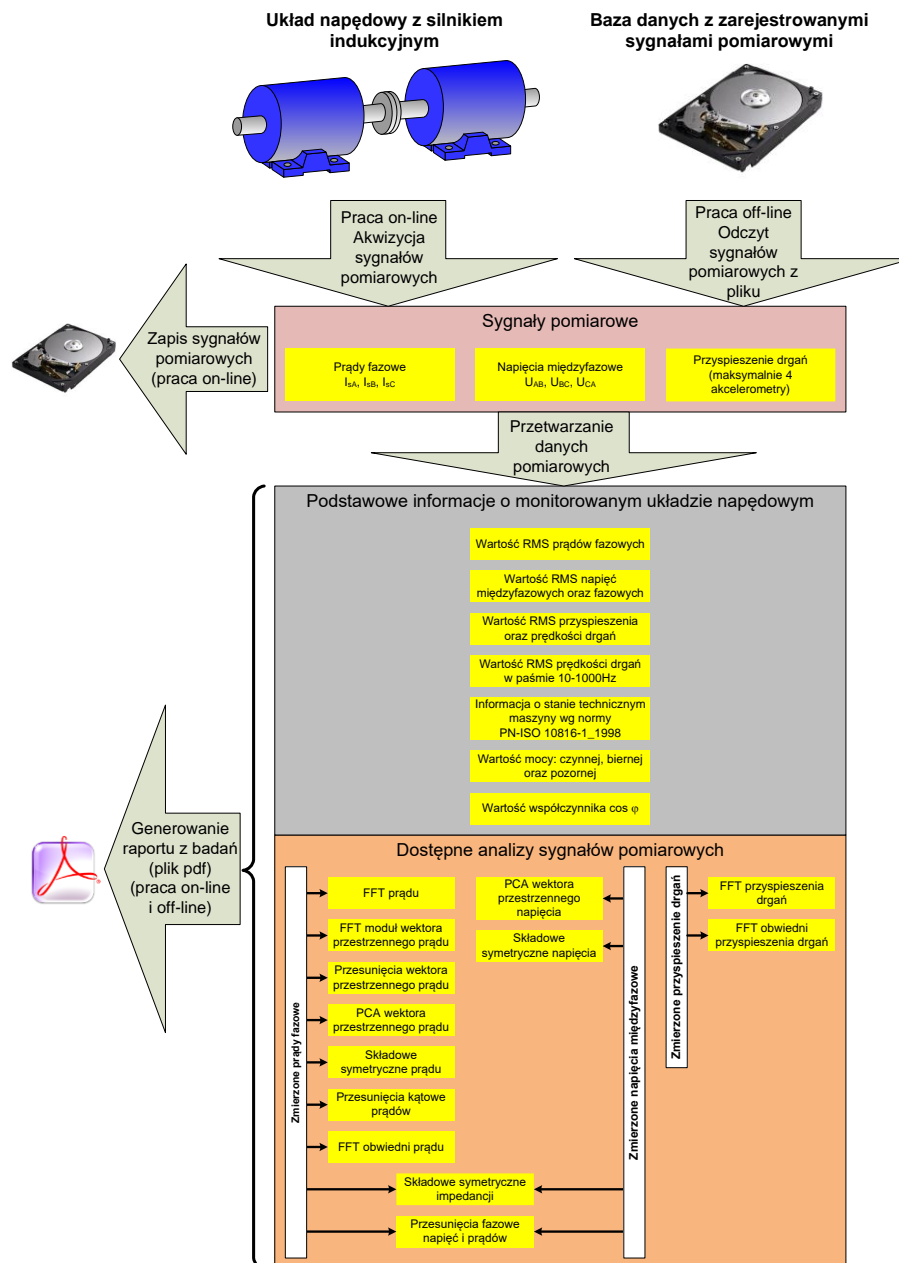
Punktacja MEiN z 2013-2018: 7.

Mój wkład w powstanie artykułu polegał na zaproponowaniu koncepcji komputerowego systemu monitorowania stanu uzwojeń silnika indukcyjnego, opracowaniu w środowisku LabView aplikacji zawierającej cztery podstawowe moduły (bazę danych silników, wybór sygnałów pomiarowych oraz ich analiz, monitorowanie maszyny – tryb on-line oraz analizę danych pomiarowych – tryb off-line.), współudziale w badaniach testowych opracowanego systemu i współredakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

Podczas wykonywania badań laboratoryjnych staram się wykonać wirtualny przyrząd pomiarowy umożliwiający akwizycję danych pomiarowych oraz wstępne przetwarzanie sygnałów diagnostycznych. W ramach pracy naukowej uczestniczyłem w opracowaniu trzech dużych systemów diagnostycznych. Pierwszy z nich, został opracowany przez mnie na potrzeby diagnostyki łożysk tocznych silnika indukcyjnego. Opisałem go przy omówieniu celu nr 1 niniejszego wniosku oraz w artykule [H6]. Drugi komputerowy system diagnostyczny powstał przy współpracy z moim Dyplomantem i dotyczył wykrywania niewyważenia oraz wyważania wirnika silnika indukcyjnego. System ten został opisany przy omówieniu celu nr 2 oraz w artykule [H12]. W [D4] przedstawiono trzeci komputerowy system do monitorowania stanu uzwojeń stojana silnika indukcyjnego. Opracowana w środowisku LabView aplikacja składa się z czterech części, które umożliwiają: tworzenie bazy danych silników elektrycznych, wyboru sygnałów pomiarowych oraz metod ich przetwarzania, monitorowanie stanu silnika w trybie on-line (jest to główny moduł aplikacji) oraz analizę danych w trybie off-line. Do analizowania danych pomiarowych użytkownik ma do wyboru szereg metod diagnostycznych: analizę widmową, analizę składowych symetrycznych, analizę przesunięć kątowych oraz analizę składowych głównych PCA. Aplikacja ma budowę modułową, co pozwala na jej łatwą rozbudowę o kolejne elementy poprawiające skuteczność detekcji uszkodzeń stojana. Opracowany komputerowy system do monitorowania stanu uzwojeń został wyposażony w opcję generowania raportu z przeprowadzonych badań. Całość została przygotowana w taki sposób, że można ją uruchomić zarówno na komputerze przemysłowym firmy National Instruments, jak i na dowolnym komputerze klasy PC wyposażonym w kartę pomiarową współpracującą ze środowiskiem LabView. Aplikacja jest na tyle elastyczna, że pozwala rejestrować jednocześnie od 1 do 10 sygnałów diagnostycznych (trzy prądy fazowe, trzy napięcia międzyfazowe oraz cztery przyspieszenia drgań). Użytkownik przypisuje kartę pomiarową oraz kanał, którym sygnał ten będzie mierzony. Opcja ta pozwala na wybór dowolnej karty pomiarowej i nie musi być to karta użyta do weryfikacji eksperymentalnej. Na rys. 4.24 przedstawiłem schemat blokowy ilustrujący koncepcję komputerowego systemu do monitorowania uzwojeń stojana silnika indukcyjnego.

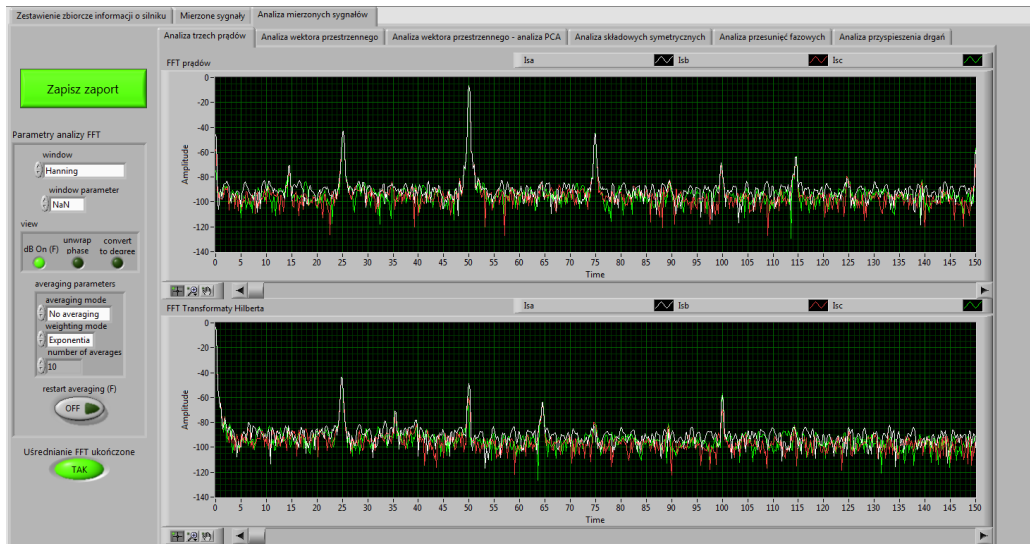
Opracowany komputerowy system monitorowania stanu uzwojenia silnika został również poddany weryfikacji eksperymentalnej na silniku indukcyjnym małej mocy firmy

Indukta zasilanym bezpośrednio z sieci i sprzęgniętym z maszyną prądu stałego. Badany silnik posiadał specjalną konstrukcję pozwalającą na fizyczne modelowanie zwarc zwojowych osobno w każdej fazie. Pomiary sygnałów diagnostycznych wykonano przy użyciu prototypowego, bezprzewodowego modułu pomiarowego wyposażonego w: kartę pomiarową NI-9205 oraz moduł komunikacyjny NI cDAQ-9191, przetworniki hallotronowe do pomiaru prądów i napięć, czterokanałowy układ do pomiaru przyspieszenia drgań akcelerometrami piezoelektrycznymi wykonanymi w technologii IEPE oraz trzy uniwersalne kanały umożliwiające pomiar sygnałów napięciowych w zakresie ± 10 V. Zastosowany moduł komunikacyjny umożliwia transmisję danych do komputera za pomocą sieci Wi-Fi oraz Ethernet.



Rys. 4.24. Konceptcja komputerowego systemu do monitorowania stanu uzwojeń stojana silnika indukcyjnego

Na rys. 4.25 przedstawiłem widok ekranu komputerowego systemu do monitorowania uzwojeń stojana silnika indukcyjnego w trakcie przeprowadzanej weryfikacji eksperymentalnej. Zaprezentowano na nim wyniki analizy widmowej trzech prądów fazowych stojana oraz obwiedni tych prądów uzyskanych przy użyciu transformaty Hilberta. Przejście między zakładkami pozwala obserwować w trybie on-line wyniki uzyskane z pozostałych analiz.



Rys. 4.25. Widok ekranu komputerowego systemu monitorowania uzwojeń stojana silnika indukcyjnego

Opracowane i przedstawione w [D4] rozwiązanie ma charakter uniwersalny i jego możliwości oparte są na zasobach programistycznych środowiska LabView, które z każdą nową wersją wydaną przez producenta są coraz szersze. Ponadto modułowa struktura opracowanego komputerowego systemu zapewnia dużą elastyczność funkcjonalną i możliwość rozbudowania o dodatkowe metody przetwarzania sygnałów, sieci neuronowe, czy też dodatkowe karty pomiarowe. *Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły poprawne działanie aplikacji oraz wykazały, że może być ona używana jako uzupełnienie obecnie stosowanych systemów diagnostycznych lub jako niezależny komputerowy system monitorujący stan uzwojeń stojana silnika indukcyjnego.*

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

[S1] Mateusz Piechocki (75%), Tomasz Pajchrowski (5%), Marek Kraft (5%), Marcin Wolkiewicz (5%), **Paweł Ewert (10%)**, *Unraveling Induction Motor State through Thermal Imaging and Edge Processing: A Step towards Explainable Fault Diagnosis*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 25, no. 3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein/170114>.

Punktacja MEiN z 2023: 200; Impact Factor: 2,5 (2022)

Mój wkład w powstanie artykułu polegał na zaproponowaniu metodyki badań laboratoryjnych, współudziale w badaniach laboratoryjnych, weryfikacji przygotowanego artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 10%.

W 2022 roku rozpocząłem współpracę z dr. hab. inż. Tomaszem Pajchrowskim z Politechniki Poznańskiej. W ramach pierwszych wspólnych prac w 2022 roku na Politechnice Wrocławskiej w Laboratorium Badań i Diagnostyki Maszyn i Napędów Elektrycznych zrealizowałem wspólnie z mgr. inż. Mateuszem Piechockim i dr. hab. inż. Tomaszem Pajchrowskim z Politechniki Poznańskiej oraz dr. hab. inż. Marcinem Wolkiewiczem, prof. uczelni badania związane z diagnostyką i monitorowaniem wybranych uszkodzeń silnika indukcyjnego. W trakcie badań sprawdzana była możliwość zastosowania obrazowania termowizyjnego do wykrywania niewyosiowania układu napędowego z silnikiem indukcyjnym oraz uszkodzeń klatki wirnika. Badania zostały zrealizowane przy wykorzystaniu kamery na podczerwień Workswell InfraRed Camera WIC 640. Celem tych badań była implementacja sieci neuronowych wykrywających wspomniane uszkodzenia na Intel Neural Compute Stick 2 współpracującym z urządzeniem tzw. hostem, z systemem operacyjnym np. Raspberry Pi. W naszym przypadku hostem było Raspberry Pi 4B. Opracowane detektory neuronowe zostały nauczone i przetestowane na danych pomiarowych uzyskanym w laboratorium Badań i Diagnostyki Maszyn i Napędów Elektrycznych podczas wspólnych pomiarów. Wyniki z uzyskanych badań zostały omówione w [S1]. Równoległe z tymi badaniami prowadzone były testy porównawcze niskobudżetowego czujnika drgań i przemysłowego akcelerometru piezoelektrycznego. Celem tych badań jest przygotowanie kolejnego artykułu o roboczym tytule „Wykrywanie uszkodzeń w silnikach elektrycznym przy użyciu konwolucyjnej sieci neuronowej i niskobudżetowego urządzenia brzegowego”.

Rozpoczęcie w 2022 roku współpracy z dr. hab. inż. Tomaszem Pajchrowskim umożliwiło mi odbycie w lipcu 2023 roku czterotygodniowego (od 3 do 31 lipca 2023 roku) stażu naukowego w Zakładzie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Instytutu Robotyki i Inteligencji Maszynowej Politechniki Poznańskiej (potwierdzenie odbycia stażu znajduje się w Załączniku nr 8). Moim opiekunem podczas stażu naukowego był właśnie dr hab. inż. Tomasz Pajchrowski. W pracach laboratoryjnych i przy obsłudze stanowiska badawczego ze strony Politechniki Poznańskiej uczestniczył mgr inż. Bartłomiej Wicher. W ramach stażu zrealizowałem następujące cele naukowe:

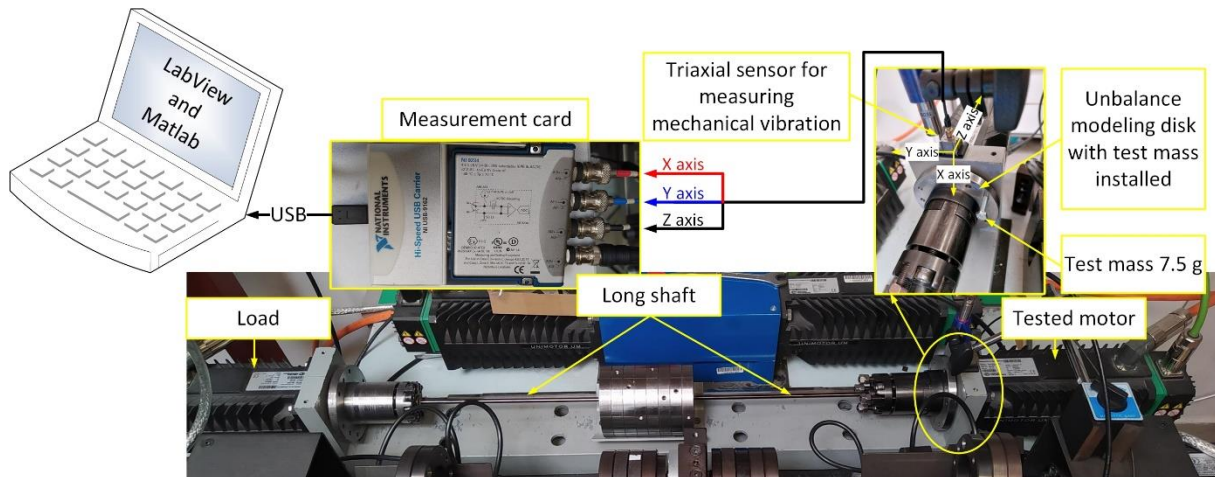
- opracowanie skutecznej metody wykrywania niewyważenia wirnika układu dwumasowego z połączeniem sprzężystym;
- analiza wpływu wartości masy testowej oraz miejsca jej zamontowania na symptomy generowane w drganiach mechanicznych, hałasie oraz sygnałach dostępnych ze struktury sterowania;
- analiza wpływu elementu sprzężystego na skuteczność detekcji niewyważenia wirnika;
- analiza wpływu wielkości luzu na pracę układu dwumasowego.

W ramach zrealizowanego stażu naukowego został przygotowany artykuł:

[S2] **Paweł Ewert (65%)**, Bartłomiej Wicher (25%), Tomasz Pajchrowski (10%), *Application of the STFT for detection of the unbalance of a drive system with an elastic interconnection*, AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKŁÓCENIA. Punktacja MEiN z 2023: 200.

Mój wkład w przygotowanie artykułu polegał na zaproponowaniu koncepcji artykułu, współudziale w wykonaniu badań laboratoryjnych, współudziale w opracowaniu analizy sygnałów, krytycznej analizie literatury, przygotowaniu wyników i współudziale w redakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 65%.

w którym skupiłem się na omówieniu wykrywania niewyważenia w układzie dwumasowym połączonym długim wałem. W trakcie badań zmieniano wartość masy testowej oraz kąt jej zamontowania. Ponadto sprawdzono jaki wpływ na poziom generowanych drgań ma użyty długi wał. W badaniach analizowano niewyważenie silnika napędowego oraz niewyważenie układu napędowego, w którym zamontowano długie wały o trzech różnych średnicach. Do wykrywania niewyważenia wykorzystano krótkoczasową transformatę Fouriera (STFT). Ponadto wyjaśniono dlaczego powinno się stosować analizę czasowo-częstotliwościową zamiast klasycznej transformaty Fouriera. Automatyzację procesu detekcji zrealizowano poprzez zastosowanie sztucznej sieci neuronowej. Badania naukowe omówione w przygotowanym artykule zostały zrealizowane na stanowisku przedstawionym na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Zdjęcie stanowiska do badania niewyważenia układu napędowego z połączeniem sprężystym

W dniu 28.09.2023 artykuł został wysłany do czasopisma AUTOMATYKA, ELEKTRYKA, ZAKŁÓCENIA i na dzień składania wniosku jest w trakcie procesu recenzowania.

Przeprowadzone w trakcie stażu badania naukowe umożliwiają przygotowanie kolejnego, wspólnego z dr. hab. inż. Tomaszem Pajchrowskim i mgr. inż. Bartłomiejem Wichrem artykułu naukowego. Ponadto możliwe jest prowadzenie kolejnych wspólnych badań z zakresu diagnostyki dwumasowego układu napędowego oraz przygotowanie wspólnego wniosku o finansowanie w ramach Narodowego Centrum Nauki.

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

6.1 Osiągnięcia dydaktyczne.

Od rozpoczęcia studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej do dzisiaj prowadziłem zarówno na studiach stacjonarnych jak i niestacjonarnych, I i II stopnia, dla Studentów: Filii w Wałbrzychu, Studium Mechatroniki, Wydziału Elektrycznego, Wydziału Mechanicznego, Wydziału Mechaniczno-Energetycznego, Wydziału Techniczno-Informatycznego, Wydziału Techniczno-Przyrodniczego następujące zajęcia dydaktyczne:

- Badanie i diagnostyka maszyn elektrycznych (laboratorium),
- Badanie i diagnostyka maszyn elektrycznych (wykład),
- Badanie i diagnostyka maszyn i napędów elektrycznych (laboratorium),
- Badanie i diagnostyka maszyn i układów napędowych (laboratorium),
- Badanie i diagnostyka napędów przekształtnikowych (laboratorium),
- Elektromechaniczne systemy napędowe (laboratorium),
- Elektrotechnika i elektronika (laboratorium),
- Grafika inżynierska (laboratorium),
- Maszyny i urządzenia elektryczne (laboratorium),
- Miernictwo elektryczne 2 (laboratorium),
- Mikroprocesorowe przetworniki pomiarowe (laboratorium),
- Napęd elektryczny (laboratorium),
- Napęd elektryczny (wykład),
- Napęd elektryczny 1 (ćwiczenia),
- Napęd elektryczny 1 (wykład),
- Napęd elektryczny 2 (laboratorium),
- Napęd robotów (laboratorium),
- Napędy robotów i obrabiarek (laboratorium),
- Podstawy automatyki i robotyki (laboratorium),
- Podstawy metrologii (laboratorium),
- Programowanie w środowisku MATLAB (laboratorium),
- Roboty w procesach przemysłowych (laboratorium),
- Roboty w procesach przemysłowych (projekt),
- Roboty w procesach przemysłowych (wykład),
- Systemy monitorowania i diagnostyki w przemyśle (laboratorium).

Byłem promotorem 40 inżynierskich prac dyplomowych oraz 23 magisterskich prac dyplomowych z zakresu diagnostyki silników elektrycznych, napędu elektrycznego, napędu robotów i obrabiarek oraz robotyki. Prowadzone pod moim kierunkiem prace otrzymały liczne nagród i wyróżnienie w różnych konkursach organizowanych dla absolwentów (Załącznik nr 9, str. 2-10).

Ponadto na studiach podyplomowych *Mechatronika Przemysłowa* organizowanych przez Wydział Mechaniczno–Energetyczny Politechniki Wrocławskiej, Dział Kształcenia Ustawicznego i E-learningu Politechniki Wrocławskiej prowadzę następujące zajęcia:

- Elektryczne układy napędowe (laboratorium),
- Robotyka (laboratorium),
- Robotyka (wykład).

Na studiach podyplomowych prowadziłem 2 prace końcowe.

W ramach projektu współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, Program Operacyjny Wiedza Edukacja Rozwój, Priorytet III Szkolnictwo Wyższe dla gospodarki i rozwoju, Działanie 3.5 Kompleksowe programy szkół wyższych w ramach konkursu nr POWR.03.05.00-IP.08-00-PZ3/18 na Zintegrowane Programy uczelni – Ścieżka III, nr umowy POWR.03.05.00-00-Z308/18-00,

Tytuł projektu: „Cyberbezpieczeństwo dla gospodarki przyszłości” opracowałem dwa wykłady do kursu „Podstawy Automatyki i Robotyki”:

- Cele i zastosowania robotów przemysłowych,
- Sterowanie i programowanie robotów przemysłowych.

Uczestniczyłem w zmodernizowaniu czterech stanowisk laboratoryjnych w Laboratorium Napędu Elektrycznego. Modernizacje polegały na zastąpieniu tradycyjnych metod pomiarowych wirtualnymi przyrządami pomiarowymi opracowanymi w środowisku LabView. Zadaniem każdego programu było wygenerowanie raportu, który miał zastępować tradycyjny protokół z pomiarów. Dzięki wprowadzonym zmianom rozszerzono możliwości dydaktyczne tych stanowisk. Ponadto poprzez opracowanie komputerowych, wirtualnych przyrządów pomiarowych rozszerzyłem możliwości dydaktyczne stanowiska w laboratorium Badań i Diagnostyki Maszyn i Napędów Elektrycznych.

Jestem współautorem podręcznika do ćwiczeń z kursu Napęd Elektryczny:

[D5] Adam Zalas, Teresa Orłowska-Kowalska, **Paweł G. Ewert**, *Napęd elektryczny: zbiór zadań projektowych z rozwiązaniami*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2015.

Mój wkład w przygotowanie podręcznika polegał na opracowaniu typograficznym, byłem odpowiedzialny za skład i łamanie tekstu, przygotowałem rysunki i zweryfikowałem rozwiązane zadania. Mój procentowy udział w przygotowanie podręcznika szacuję na 30%.

Wspólnie z moimi dyplomantami przygotowałem liczne publikacje naukowe oraz konferencyjne.

Od roku akademickiego 2015/2016 jest członkiem Komisji Egzaminów Dyplomowych na kierunku Elektrotechnika dla studentów pierwszego i drugiego stopnia na Wydziale Elektrycznym.

W 2012 roku ukończyłem jednosemestralny Kurs Dydaktyczny Szkoły Wyższej (110 godzin zajęć dydaktycznych) – Załącznik nr 9, str. 11 i 12.

6.2 Osiągnięcia organizacyjne.

- Od 2013 roku biorę czynny udział w organizacji oraz prowadzeniu zajęć edukacyjnych dla młodzieży w ramach Dolnośląskiego Festiwalu Nauki na Politechnice Wrocławskiej (Załącznik nr 9, str. 13-18).
- Od 2015 roku w ramach obowiązków organizacyjnych pełnię funkcję i obowiązki kierownika Laboratorium Napędu Elektrycznego w Katedrze Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych (Załącznik nr 9, str. 19).
- Od 2017 roku jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej PTETiS. Ponadto jestem członkiem Komisji Rewizyjnej.
- W 2018 i 2019 roku zaangażowałem się przy realizacji IV i V edycji Wrocławskiego Dnia Młodego Elektryka (WDME) (Załącznik nr 9, str. 20).

6.3 Osiągnięcia popularyzujące naukę lub sztukę.

Na zaproszenie Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich Oddział w Legnicy, na finałowej gali konkursu *Technik Absolwent Roku* w dniu 23.11.2017 roku w auli Politechniki Wrocławskiej w Legnicy wygłosiłem wykład pt. „Nadeszła era robotów – roboty ramieniowe i mobilne”.

W dniach 16 i 17 lutego 2023 roku Katedra Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych we współpracy z firmą JaDan Automatyka Przemysłowa zrealizowała kolejną edycję kursu „Programowanie i obsługa przetwornic częstotliwości Danfoss”. Na zaproszenie organizatorów pierwszego dnia kursu wygłosiłem wykład pt. „Diagnostyka silników prądu przemiennego” (<https://kmmnipe.pwr.edu.pl/katedra/aktualnosci/kurs-danfoss-12.html>).

Biorę czynny udział w konferencjach naukowych krajowych i międzynarodowych, na których prezentuję przygotowane artykuły:

- **Paweł G. Ewert**, Czesław Kowalski, *The system for monitoring and diagnosis of the condition of induction motor rolling bearings*. 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, EDPE 2013, October 2-4, 2013, Dubrovnik, Chorwacja – sesja plenarna.
- **Paweł G. Ewert**, Marcin Musiał, *Wybrane metody monitorowania niewyosiowania układu napędowego z silnikiem indukcyjnym (ang. Selected monitoring methods of the induction motor drive system misalignment)*. LII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych (SME 2016), 20-22 czerwca 2016, Kazimierz Dolny, Polska – sesja posterowa.
- **Paweł Ewert**, *Wykrywanie uszkodzeń wirnika i stojana silnika indukcyjnego za pomocą strumienia poosiowego (ang. Detection of induction motor rotor and stator faults by axial flux)*. II konferencji naukowo technicznej Energooszczędne Napędy Przekształtnikowe w Przemysle (ENPP), 7-9 czerwca 2017, Trzebieszowice, Polska – sesja plakatowa.
- **Paweł G. Ewert**, *Use of axial flux in the detection of electrical faults in induction motors*. 2017 International Symposium on Electrical Machines (SME2017), 18-21 czerwca 2017, Nałęczów, Polska – sesja posterowa.
- **Paweł Ewert**, Adrian Dębski, *Zastosowanie sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych (ang. Application of neural networks to detect rolling bearings faults in induction motors)*. III konferencji naukowo technicznej Energooszczędne Napędy Przekształtnikowe w Przemysle (ENPP), 14-16 czerwca 2018, Trzebieszowice, Polska – sesja plakatowa.
- **Paweł G. Ewert**, Michał Jaworski, *Zastosowanie analizy bispectrum do wykrywania niewyważenia wirnika silnika indukcyjnego (ang. Use of the bispectrum analysis to detect the induction motor rotor unbalance)*. XIV Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2019, 20-22 listopada 2019, Łódź, Polska – sesja plenarna.
- **Paweł G. Ewert**, Michał Jaworski, *Application of selected higher-order methods to detect rotor unbalance of drive system with PMSM*. 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 25-29 kwietnia 2021, Gliwice, Poland – sesja plenarna.

Powyższe zestawienie obejmuje mój udział w konferencjach po uzyskaniu stopnia doktora. Szczegółowe zestawienie wszystkich konferencji (również tych przed uzyskaniem stopnia doktora) przedstawiłem w *Wykazie osiągnięć naukowych albo artystycznych* (Załącznik nr 4).

Biorę czynny udział w przygotowywaniu recenzji artykułów konferencyjnych:

- International Interdisciplinary PhD Workshop,
- IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC),
- International Symposium on Electrical Machines (SME),

oraz w czasopismach, w tym z listy filadelfijskiej:

- Applied Sciences,
- COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering,
- Energies,
- IEEE Transactions on Systems,
- Man and Cybernetics: Systems,
- Power Electronics and Drives,
- Przegląd Elektrotechniczny,
- Tribology Transactions.

Łącznie przygotowałem 20 recenzji.

Brałem aktywny udział w:

- seminarium *Monitorowanie i diagnostyka maszyn i urządzeń*, Seminarium dla sektora produkcji i budownictwa, Trademedia, Warszawa, Polska, 19 września 2012 (Załącznik nr 9, str. 21).
- forum naukowo-technicznym, *Automatyzacja i robotyzacja w przemyśle*, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Warszawa, Polska, 12-13 grudnia 2013 (Załącznik nr 9, str. 22).
- panelu dyskusyjnym, *Diagnostyka maszyn*, moderatorzy dyskusji: dr inż. Zbigniew Ławrowski (Energotest Diagnostyka), prof. dr hab. inż. Czesław Kowalski (Politechnika Wrocławska) podczas II konferencji naukowo technicznej *Energooszczędne Napędy Przekształtnikowe w Przemysle (ENPP)*, Trzebieszowice, Polska, 7-9 czerwca 2017.
- panelu dyskusyjnym, *Diagnostyka maszyn*, moderatorzy dyskusji: dr inż. Zbigniew Ławrowski (Energotest Diagnostyka), prof. dr hab. inż. Czesław Kowalski (Politechnika Wrocławska) podczas III konferencji naukowo technicznej *Energooszczędne Napędy Przekształtnikowe w Przemysle (ENPP)*, Trzebieszowice, Polska, 14-16 czerwca 2018.

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

7.1 Nagrody i odznaczenia.

- Nagrody JM Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni przyznane w latach 2014, 2016 i 2022 (Załącznik nr 9, str. 23-25).
- Medal Brązowy za Długoletnią Służbę - postanowienie Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 27 października 2022 roku (Załącznik nr 9, str. 26).
- Laureat programu SECUNDUS Politechniki Wrocławskiej dla młodych naukowców z najlepszym dorobkiem publikacyjnym w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika za rok 2019 i 2020.

7.2 Realizacja projektów badawczych, celowych, rozwojowych, zamawianych i międzynarodowych.

- Projekt badawczy MNiSW/NCN N510 637340 (13.04.2011- 12.10.2013) – *System do monitorowania i diagnostyki uzwojeń stojana silnika indukcyjnego* – wykonawca.
- Udział w badaniach silników elektrycznych przy ekspertyzie dla sądu Rejonowego w Kaliszu V Wydział Gospodarczy, lipiec 2012.
- Projekt badawczy z zakresu badań podstawowych – NCN, OPUS, 2017/27/B/ST7/00816 (3.09.2018-2.12.2022), *Hybrydowe metody detekcji uszkodzeń silników synchronicznych z magnesami trwałymi w napędach elektrycznych ze sterowaniem wektorowym przy wykorzystaniu obliczeń analitycznych i neuronowych* – członek zespołu badawczego, <https://projekty.ncn.gov.pl/index.php?s=22807>
- Projekt rozproszonego systemu pomiarowego do akwizycji danych pomiarowych na Porcie Południe na zamówienie MPWiK Wrocław, styczeń 2019 – współrealizator.
- Projekt przemysłowy pt. *Badania układu napędowego wycieraczek, montowanych w autobusach turystycznych Volvo pod kątem występujących uszkodzeń* dla firmy Volvo Polska, ul. Mydlana 2, 55-502 Wrocław – kierownik zespołu badawczego, 2022 rok.
- Europejski projekt nr 101101961 (10HE/0004/22), tytuł: Hybrid Electric regional Aircraft distribution TEchnologies (HECATE), (Rozwiązania w zakresie dystrybucji energii elektrycznej dla regionalnych samolotów hybrydowo-elektrycznych) – wykonawca od 2023 roku.

7.3 Udział w szkoleniach.

- Szkolenie z zakresu programowania i obsługi HEXOR II Dydaktyczny Robot Mobilny, 18.03.2011, Spółka Technologiczna STENZEL działająca w strukturze Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej (Załącznik nr 9, str. 27 i 28).
- Seminarium *Monitorowanie i diagnostyka maszyn i urządzeń*, 19.09.2012, TRADEMEDIA (Załącznik nr 9, str. 21).
- Forum naukowo-techniczne „*Automatyzacja i Robotyzacja w Przemysle*” (12-13.12.2013), Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP (Załącznik nr 9, str. 22).

- Świadectwo ukończenia szkoleń (Załącznik nr 9, str. 29 i 30):
 - 21-22.02.2022, Mitsubishi Electric B.V. – Polish Branch
 - *Programowanie i obsługa robotów przemysłowych.*
 - 22-24.03.2023, Mitsubishi Electric B.V. – Polish Branch
 - *Zaawansowane programowanie robotów przemysłowych.*
 - *Zaawansowane opcje bezpieczeństwa w robotach.*
 - *Synchronizacja robotów z taśmociągami i systemami wizyjnymi 2D.*

.....
(podpis wnioskodawcy)