

Maciej Sułowicz

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Załącznik nr 3

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych



## AUTOREFERAT

### 1. Imię i nazwisko

Maciej Sułowicz

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania, tytułu rozprawy doktorskiej i nazwisk osób, które pełniły funkcje promotora i recenzentów

04.07.1997 **Magister inżynier** w dyscyplinie elektrotechnika, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, specjalność: Automatyka. Temat pracy: *Opracowanie systemu monitorowania stanu wybranego układu zautomatyzowanego*, Promotor: prof. dr hab. inż. Lech Bukowski.

1997-2001 Stacjonarne Studia Doktoranckie na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo - Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

20.07.2005 **Doktor nauk technicznych** w dyscyplinie elektrotechnika, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, tytuł pracy: *Diagnostyka silników indukcyjnych metodami sztucznej inteligencji*, Promotor: Prof. zw. dr hab. inż. Tadeusz Sobczyk; recenzenci: Prof. zw. dr hab. inż. Stanisław Osowski, dr hab. inż. Piotr Drozdowski, prof. PK - wyróżniona rozprawa doktorska.

2011-2012 Studia podyplomowe, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie: „Menedżer badań naukowych i prac rozwojowych”.

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

10.2001 - 04.2004 – Asystent naukowy - Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki, Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Pracownia w Krakowie.

05.2004 - 07.2005 - Asystent naukowy - Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, Samodzielna Pracownia Diagnostyki Układów Elektromechanicznych w Krakowie.

10.2005 - 02.2006 - Asystent naukowo-dydaktyczny, Katedra Maszyn Elektrycznych, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Politechnika Krakowska.

03.2006 - Adiunkt naukowo-dydaktyczny, Katedra Diagnostyki Maszyn Elektrycznych, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Politechnika Krakowska.

### 4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny Elektrotechnika zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (wg pkt. 1.2 niniejszych *Zasad prowadzenia postępowań habilitacyjnych*)

#### 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego (zgodnie z wnioskiem),

Osiągnięciem naukowym, uzyskanym po otrzymaniu stopnia doktora, jest cykl powiązanych tematycznie publikacji, zatytułowany:

**„Opracowanie i weryfikacja skutecznych metod i algorytmów diagnostycznych dla oceny stanu technicznego maszyn prądu przemiennego”** – cykl 18 publikacji

4.2. Wykaz prac naukowych (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, nazwa czasopisma, tom, strony,) <sup>2)</sup>, dokumentujących osiągnięcie (osiągnięcia) naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego,

Lp.	Autor/autorzy, rok wydania, tytuł publikacji, nazwa wydawnictwa, nazwa czasopisma, tom, strony	IF (MNiSW) Udział
P1	<b>Sułowicz M.</b> , Węgiel T., Borkowski D., Weinreb K., 2010, <i>Specialized diagnostic system for induction motors</i> . Przegląd Elektrotechniczny, R. 86 No. 4/2010, pp. 285-291, ISSN 0033-2097.	0.242 (9 pkt) 50%
P2	Dziechciarz A., <b>Sułowicz M.</b> , 2012, <i>Zastosowanie analizy falkowej do diagnozowania uszkodzeń w silniku indukcyjnym podczas pracy przy zmiennym obciążeniu</i> . Technical Transactions - Czasopismo Techniczne, 1-E/2012, Zeszyt 24, Rok 109, 2012, s. 49-64, ISSN 1897-6301.	- (5 pkt) 70%
P3	Dziechciarz A., Ferreira De Sa J.A., <b>Sułowicz M.</b> , 2014, <i>Detection of the rotor bars damage in cage induction motor using neural network and wavelet analysis</i> . Elektrotechnika w zastosowaniach trakcyjnych: praca zbiorowa pod red. Adama St. Jagiełły; Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki – Kraków: Wydawnictwo PK, Monografia 450, s. 109-121, ISSN 0860-097X.	- (5 pkt) 70%
P4	<b>Sułowicz M.</b> , Weinreb K., Mielnik R., Żywczak T., Jaraczewski M., 2015, <i>The method of current measurement in the rotor cage bars of prototype induction motor with the use of Rogowski coils</i> . Proceedings of The International Conference on Information and Digital Technologies 2015, 7-9 July 2015, Zilina – Slovakia, pp. 345-353, doi: 10.1109/DT.2015.7222997, ISBN 978-1-4673-7185-8.	WoS (15 pkt) 50%
P5	Rodriguez P., Sahoo S., Pinto C.T., <b>Sułowicz M.</b> , 2015, <i>Field current signature analysis for fault detection in synchronous motors</i> . 2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Guarda, 2015, pp. 246-252. doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303697.	WoS (15 pkt) 50%
P6	Wroński W., <b>Sułowicz M.</b> , Dziechciarz A., 2015, <i>Dynamic and static eccentricity detection in induction motors in transient states</i> . Technical Transactions - Electrical Engineering, Iss. 2-E, pp. 171-194, Y. 112, Iss. 13. – doi: 10.4467/2353737XCT.15.095.3927, ISSN 1897-6301.	- (13 pkt) 60%
P7	Tulicki J., <b>Sułowicz M.</b> , 2015, <i>Non-invasive diagnostics of the rotor the asynchronous motor with using start up stator current</i> . Technical Transactions - Electrical Engineering, Iss. 2-E, pp. 159-170, Y. 112, Iss. 13. – doi: 10.4467/2353737XCT.15.094.3926, ISSN 1897-6301.	- (13 pkt) 60%
P8	Tulicki J., <b>Sułowicz M.</b> , Pragłowska-Ryłko N., 2016, <i>Application of the Bispectral analysis in the diagnosis of cage induction motors</i> . 2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), Rzeszow, pp. 1-8. doi: 10.1109/WZEE.2016.7800196.	WoS (15 pkt) 60%
P9	Weinreb K., <b>Sułowicz M.</b> , Petryna J., 2016, <i>Faults detection in cage induction motor with parallel branches</i> . Technical Transactions - Electrical Engineering, 2-E/2016, pp. 53-64, Y. 113, Iss. 12, doi: 10.4467/2353737XCT.16.247.6046, ISSN 1897-6301.	- (13 pkt) 60%

P10	Zajac M., <b>Sulowicz M.</b> , 2016, <i>The detection of coil shorting in induction motors by means of wavelet analysis</i> . Technical Transactions - Electrical Engineering, 2-E/2016, pp. 135-150, Y. 113, Iss. 12, doi: 10.4467/2353737XCT.16.253.6052, ISSN 1897-6301.	- (13 pkt) 60%
P11	Tulicki J., Petryna J., <b>Sulowicz M.</b> , 2016, <i>Fault diagnosis of induction motors in selected working conditions based on axial flux signals</i> . Technical Transactions - Electrical Engineering, 3-E/2016, s. 99-113, Y. 113, Iss. 13, 10.4467/2353737XCT.16.269.6068, ISSN 1897-6301.	- (13 pkt) 50%
P12	Sahoo S., Rodriguez P., <b>Sulowicz M.</b> , 2017, <i>Evaluation of different monitoring parameters for synchronous machine fault diagnostics</i> . Electrical Engineering, Vol. 99, Iss. 2, pp. 551 – 560, doi: 10.1007/s00202-016-0381-6, ISSN 1432-0487.	1.269 (15 pkt) 50%
P13	Tulicki J., Weinreb K., <b>Sulowicz M.</b> , 2017, <i>The possibility of distinguishing rotor cage bar faults in double squirrel cage induction motors on the basis of the stator current signal</i> . 2017 International Symposium on Electrical Machines (SME), Naleczow, Poland, 18-21 June 2017 pp. 1-6. doi: 10.1109/ISEM.2017.7993563, ISBN 978-1-5386-0359-8.	WoS (15 pkt) 50%
P14	Zajac M., <b>Sulowicz M.</b> , 2018, <i>Periodic flows of the axial flux signal energy making it difficult of the induction motor faults detection</i> . International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. Vol. 57, Iss. S1, Spec. Iss., pp. 235-249, doi: 10.3233/JAE-182319, ISSN 1875-8800.	0.804 * (15 pkt)** 50%
P15	Rzeczucinski P., Orman M., Pinto C.T., Tkaczyk A., <b>Sulowicz M.</b> , 2018, <i>Bearing health diagnosed with a mobile phone: acoustic signal measurements can be used to test for structural faults in motors</i> . IEEE Industry Applications Magazine. Vol. 24, Iss. 4, pp. 17-23. doi: 10.1109/MIAS.2017.2740463, ISSN 1558-0598.	0.864 * (15 pkt)** 40%
P16	Zajac M., <b>Sulowicz M.</b> , Petryna J., 2018, <i>Partial discharges emission testing in the generator winding insulation in the time-frequency domain</i> . 2018 International Symposium on Electrical Machines (SME 2018), Andrychów, Poland, 10-13 June 2018. IEEE, pp. 1-8. doi: 10.1109/ISEM.2018.8442976, ISBN 978-1-5386-5210-7.	Scopus (15 pkt) 50%
P17	<b>Sulowicz M.</b> , Czechowski M., 2018, <i>Diagnostyka silników indukcyjnych klatkowych w układach napędowych wagonów tramwajowych</i> . Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe. Nr 3 (119), s. 189-195, ISSN 2084-5618.	- (7 pkt) 80%
P18	<b>Sulowicz M.</b> , Ludwinek K., Tulicki J., Depczynski W., Nowakowski L., 2019, <i>Practical Adaptation of a Low-Cost Voltage Transducer with an Open Feedback Loop for Precise Measurement of Distorted Voltages</i> . Sensors 2019, 19(5), 1071, doi.org/10.3390/s19051071, ISSN 1424-822.	2.475 * (30 pkt)** 40%
	<b>Sumaryczny IF</b> <b>Suma pkt</b> <b>Średni udział</b>	5.654 (241 pkt) 55.56%

\* w roku publikacji IF nie był określony; podany IF jest za rok 2017 tj. najbliższy poprzedzający publikację

\*\* w roku publikacji punkty MNiSW nie były określone; podane punkty są za rok 2016 tj. najbliższy poprzedzający publikację

### **4.3. Omówienie celu naukowego w/w prac i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania, w tym omówienie oryginalnych osiągnięć o charakterze konstrukcyjnym, technologicznym lub projektowym,**

#### **4.3.1 Wprowadzenie w zakres tematyki osiągnięcia naukowego**

W ostatnich latach można zaobserwować wzrost zainteresowania bezinwazyjną diagnostyką stanu maszyn elektrycznych, pracujących w układach napędowych oraz w złożonych systemach wytwarzania energii. Zawdzięczamy to znacznemu postępowi w rozwoju dedykowanych przenośnych lub stacjonarnych systemów monitoringu i diagnostyki maszyn. Diagnostyka stanu maszyn jest coraz bardziej powszechna i nietrudno wskazać ekonomiczną opłacalność okresowo czy ciągle prowadzonych działań diagnostycznych.

Głównym zadaniem diagnostyki eksploatacyjnej maszyn elektrycznych jest określanie ich stanu technicznego za pomocą obiektywnych metod i środków. Metody te powinny pomóc określić z maksymalnie dużym prawdopodobieństwem, jak długo badana maszyna może pracować bez większego ryzyka wystąpienia uszkodzenia czy awarii. W celu zapewnienia wiarygodnej oceny z wykorzystaniem metody diagnostycznej, którą stosujemy do określenia stanu maszyny, musimy być pewni co do poprawności zbierania i przetwarzania sygnałów diagnostycznych podczas całego procesu oceny diagnostycznej.

W diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych do oceny: ekscentryczności, stanu klatki, stanu uzwojeń czy łożysk można zastosować metodę pomiaru i analizy prądu stojana. Takie podejście jest chętnie i często stosowane, gdyż w sygnale prądu są zawarte symptomy prawie wszystkich uszkodzeń, które mogą wystąpić w tych maszynach. Utrudnieniem analizy jest w tym przypadku umiejętność wydobycie określonego symptomu diagnostycznego z sygnału podstawowego.

W diagnostyce maszyn elektrycznych z powodzeniem można stosować również wiele innych sygnałów, które pozwalają na bezinwazyjny pomiar i ocenę stanu maszyny bez konieczności jej zatrzymania czy demontażu. Użycie pomiarowo dostępnych sygnałów i nowych innowacyjnych narzędzi do diagnostyki jest aktualnym kierunkiem badań w wielu ośrodkach badawczych w kraju i zagranicą.

Tematyka diagnostyki maszyn i urządzeń elektrycznych była głównym obszarem moich zainteresowań od początku pracy badawczej. Od rozpoczęcia pracy w Katedrze Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektromechanicznych Przemian Energii Politechniki Krakowskiej (obecnie Katedra Diagnostyki Maszyn Elektrycznych) w roku 1998, zajmowałem się tematyką analizy stanów awaryjnych i diagnostyką maszyn prądu przemiennego. Początkowo z Katedrą związany byłem jako doktorant, a po obronie rozprawy doktorskiej, pracowałem na stanowisku asystenta i adiunkta naukowo-dydaktycznego.

Moje prace badawcze przed doktoratem były ukierunkowane na rozwijanie algorytmów diagnostycznych związanych z wykrywaniem ekscentryczności oraz uszkodzeń klatek wirników silników indukcyjnych. Opracowane z moim udziałem algorytmy diagnostyczne bazowały na wzorcach diagnostycznych, wykreowanych przy użyciu wyspecjalizowanych modeli matematycznych maszyn indukcyjnych klatkowych. Ważnym zadaniem badawczym było opracowywanie algorytmów diagnostycznych bazujących na metodach sztucznej inteligencji, w tym szczególnie na rozpoznawaniu wzorców za pomocą sztucznych sieci neuronowych. W ramach tego zadania wykorzystywałem zaawansowane techniki przetwarzania danych i sygnałów na wstępnym etapie obróbki danych modelowych.

W początkowym okresie mojej pracy w Katedrze, badania były w znaczącym stopniu skoncentrowane w ramach projektów badawczych finansowanych przez Komitet Badań Naukowych. W latach 1996-1999 zrealizowano projekt badawczy „Zastosowanie technik rozpoznawania obrazów dla diagnostyki maszyn elektrycznych prądu przemiennego bazującej na prądach pomiarowo dostępnych” (nr 8 T10 A 033 11). Od października 1998 r. uczestniczyłem w tym projekcie jako wykonawca i realizowałem zadania związane z przygotowaniem modeli obliczeniowych oraz algorytmów diagnostycznych wykorzystujących metody sztucznej inteligencji.

W latach 2001 - 2003 brałem udział w realizacji projektu badawczego „Bazy danych dla zastosowania metod sztucznej inteligencji w bezinwazyjnej diagnostyce wirników silników klatkowych” (PB 1696/ T10/201/21) w charakterze głównego wykonawcy. W ramach tego projektu

rozwijałem modele matematyczne na potrzebę generacji wzorców diagnostycznych. Opracowałem również optymalne struktury relacyjnych baz danych do składowania dużej ilości informacji o charakterystycznych cechach wzorców diagnostycznych, na potrzebę implementacji metod sztucznej inteligencji.

W roku 2004 w ramach projektu promotorskiego „*Diagnostyka silników indukcyjnych metodami sztucznej inteligencji*” (nr 4 T10A 047 24), realizowałem badania związane bezpośrednio z moją rozprawą doktorską.

W rozprawie doktorskiej pt. „*Diagnostyka silników indukcyjnych metodami sztucznej inteligencji*” przeprowadziłem badania nad zastosowaniem metod sztucznej inteligencji do diagnostyki wirników silników indukcyjnych klatkowych. Do opracowania technik diagnozowania stanu silnika przyjąłem wzorce diagnostyczne mające postać widm Fouriera prądów stojana. Wzorce uzyskałem z rozwiązań obwodowego wieloharmonicznego modelu matematycznego silnika, który uwzględniał ekscentryczności wirnika oraz uszkodzenia klatki. Model ten wykorzystywał metodę bilansu harmonicznym równań napięciowych maszyny opisanych w składowych symetrycznych. Bazując na modelu matematycznym przygotowałem pakiet programów numerycznych pozwalający badać wpływ wymienionych uszkodzeń wirnika na widmo Fouriera prądów faz stojana w dowolnym silniku indukcyjnym. W rozprawie, stosując metody sztucznej inteligencji, przedstawiłem oryginalną koncepcję systemu wnioskowania diagnostycznego, w którym wykorzystałem sieci neuronowe, rozpoznawanie wzorców oraz logikę rozmytą. Podejście to uwzględniało z jednej strony bazę danych wzorców diagnostycznych, z drugiej strony bazę danych pomiarów archiwizowanych, wykonanych w całym okresie użytkowania maszyny oraz blok wnioskowania diagnostycznego oparty na metodach sztucznej inteligencji. Zbadałem możliwości zastosowania:

- sieci typu perceptronu wielowarstwowego (MLP) oraz sieci neuronowe typu Support Vector Machine (SVM),
- technik rozpoznawania wzorców i zastosowałem metodę opartą o funkcje przynależności i trzyetapowe rozpoznawanie wzorców: etap recepcji, etap przyporządkowanie i etap podejmowania decyzji,
- logiki rozmytej i wybrałem klasyczny system wnioskowania rozmytego Mamdaniego-Zadeha oraz Takagi – Sugeno – Kanga. Opracowałem również algorytm wnioskowania oparty o sieci neuronowe rozmyte (neuro-fuzzy) bazujące na strukturze ANFIS.

Dla wszystkich opracowanych algorytmów diagnostycznych uzyskałem zadawalającą skuteczność i trafność diagnozy. Najlepsze wyniki dla oceny stanu technicznego maszyny uzyskałem dla sieci neuronowych typu SVM.

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki pozwoliły dowieść słuszności tezy, że możliwe jest opracowanie metod wnioskowania diagnostycznego, bazujących na rozwiązaniach modelu matematycznego. Udowodniłem, że powiązanie specjalistycznej wiedzy o zjawiskach elektromagnetycznych w silnikach indukcyjnych klatkowych z najnowszymi osiągnięciami w zakresie metod sztucznej inteligencji pozwala na opracowanie systemów diagnostycznych ograniczających rolę wysokokwalifikowanych specjalistów w procesie diagnozowania. Rola personelu eksploatującego napęd z silnikiem indukcyjnym klatkowym, wyposażony w system diagnozowania stanu sprowadza się więc jedynie do umiejętnego i rozważnego posługiwania się narzędziami diagnostycznymi.

Wszystkie metody diagnostyczne użyte w doktoracie były przygotowywane dla ustalonego stanu pracy maszyny. Nie rozważano stanów przejściowych, czy też stanów dynamicznych. W rozprawie doktorskiej nie zakładano weryfikacji opracowanych metod diagnostycznych na podstawie danych pozyskanych z badań laboratoryjnych dla różnie uszkodzonych silników elektrycznych. Wynikało to przede wszystkim z braku odpowiedniego zaplecza technicznego w Katedrze Maszyn Elektrycznych, które pozwoliłoby na przeprowadzenie badań i pozyskanie odpowiedniej bazy danych dla różnie uszkodzonych silników.

Po obronie rozprawy doktorskiej podjąłem próbę przygotowania stanowisk badawczych i weryfikacji w warunkach laboratoryjnych różnych algorytmów diagnostycznych bazując na obiektach o małej mocy (do 10 kW) posiadających możliwości kontrolowanego zadawania uszkodzeń. Doświadczenia laboratoryjne zostały później wykorzystane do prawidłowej oceny możliwych uszkodzeń maszyn o większych mocach pracujących w warunkach przemysłowych.

W latach 2005-2007 brałem udział jako główny wykonawca w projekcie badawczym finansowanym przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji pt. „*Rozproszony system diagnostyczny silników asynchronicznych dużych mocy*”. Realizacja tego projektu pozwoliła mi podejść do zagadnień diagnostyki stanu silników indukcyjnych od strony praktycznej. Zainspirowany realizacją tego projektu zacząłem rozwijać moje umiejętności w zakresie wykonywania pomiarów dla maszyn i urządzeń elektrycznych w obiektach przemysłowych.

Od roku 2005 do roku 2009 realizowałem tematy związane z diagnostyką procesów przemysłowych. Podczas kilkuletniej realizacji prac opracowałem modele neuronowe do prognozowania temperatury wody w sieci przemysłowej w kilkunastu różnych instalacjach produkcyjnych w przedsiębiorstwie PKN Orlen w Płocku. Zadanie to zrealizowałem dla wybranych punktów pierścieniowej sieci wody obiegowej zasilającej i powrotnej, wykorzystywanej do obniżania temperatury produktów naftowych. W ramach tych badań opracowałem prototyp systemu diagnostycznego do ciągłej diagnostyki stanu 8 silników pracujących w układach pompowych sieci wody obiegowej. Prototyp tego systemu przez długi okres automatycznie rejestrował i analizował dane on-line na jednej z rozdzielni elektrycznych.

Od początku pracy w Katedrze Maszyn Elektrycznych, którą kierował Profesor Tadeusz Sobczyk, poprzez realizację większych projektów badawczych zostałem wdrożony do pracy w zespole, aby wspólnie realizować zaawansowane prace badawcze. Wielokrotnie inspirowałem pomysłami członków zespołu, z którymi współpracowałem.

W roku 2008 rozpocząłem współpracę z Korporacyjnym Centrum Badawczym ABB w Krakowie, a w roku 2014 z ABB Corporate Research Sweden. Pod moim kierownictwem zespoły pracowników z Politechniki Krakowskiej, w różnych konfiguracjach personalnych, zrealizowały 9 prac badawczo-rozwojowych. Prace te dotyczyły badań diagnostycznych dla różnych uszkodzeń maszyn prądu przemiennego, przy różnych warunkach zasilania i obciążenia. Prace dla ABB były realizowane w latach 2008-2015.

Pierwsze z prac dotyczyły badania urządzenia UMC 100, które aktualnie jest dostępne w sprzedaży na rynku. W roku 2015 jednym z zadań badawczych były testy czujnika, który aktualnie też jest w sprzedaży rynkowej pod nazwą handlową ABB Ability Smart Sensor. Jest to autonomiczne urządzenie do diagnostyki z bezprzewodową transmisją danych, które premierową prezentację miało na targach CeBIT w Hanowerze w roku 2016. Podczas premierowej prezentacji (przez prezesa firmy ABB) obecni byli m.in. prezydent USA Barack Obama oraz kanclerz Niemiec Angela Merkel.

Wspólnie z pracownikami ABB z czterech Centrów Badawczych: Polski, Szwecji, Indii i Chin, w różnych konfiguracjach autorskich przygotowałem 6 publikacji, z których trzy dołączyłem do mojego osiągnięcia naukowego. We wszystkich tych publikacjach byłem osobą wiodącą i inspirującą do ich powstania.

W roku 2009, w ramach badań własnych zapoczątkowałem kierunek badawczy związany z analizą sygnałów pozyskanych z dynamicznych i przejściowych stanów pracy maszyny oraz wykorzystania tych informacji do skutecznej oceny stanu technicznego maszyny elektrycznej. Ten kierunek sukcesywnie kontynuowałem przez dłuższy okres i kontynuuję go do chwili obecnej, stosując nowe transformacje i algorytmy analiz czasowo-częstotliwościowych.

Zdobyte doświadczenie w testowaniu algorytmów i pomiarach na rzeczywistych obiektach wykorzystałem w latach 2009-2012 podczas realizacji, jako wykonawca, projektu badawczo - rozwojowego NCBiR pt. „*Układ do wytwarzania energii elektrycznej dla małych elektrowni wodnych z generatorem wzbudzonym magnesami trwałymi pracującym przy zmiennej prędkości obrotowej*”.

W latach 2006 – 2018, prowadziłem prace w ramach projektów działalności statutowej. Jednym z ważniejszych działań badawczych, jakie wykonałem było wykorzystanie najnowszych narzędzi i technik informacyjnych do kondycjonowania i akwizycji sygnałów na potrzebę bezinwazyjnej diagnostyki maszyn i urządzeń elektrycznych. Również w ramach tych działań opracowywałem i zaaplikowałem nowe metody diagnostyczne maszyn elektrycznych.

W licznych pracach badawczych i pracach zleconych po uzyskaniu stopnia naukowego doktora zdobywałem doświadczenie w wykonywaniu pomiarów mających na celu określenie szeroko rozumianego stanu technicznego maszyn lub urządzeń elektrycznych. Od roku 2011 do roku 2019 wykonałem ponad 65 różnorodnych prac związanych z badaniami w przemyśle, w których istotnym aspektem była ocena stanu technicznego maszyn i urządzeń elektrycznych.



Jeszcze większe zintensyfikowanie moich prac w przemyśle nastąpiło w roku 2014, tj. od czasu realizacji dwóch staży przemysłowych. Staże te pozwoliły mi połączyć dotychczasową posiadaną wiedzę teoretyczną z praktyką przemysłową. Nauczyłem się wdrażać metody i algorytmy diagnostyczne do praktycznego zastosowania.

Liczne prace w przemyśle pozwoliły mi wspólnie z pracownikami Politechniki Krakowskiej i Politechniki Świętokrzyskiej opracować 3 innowacyjne rozwiązania, które jako wynalazek w roku 2019 zostały zgłoszone w Urzędzie Patentowym RP.

Współpraca z Miejskim Przedsiębiorstwem Komunikacyjnym S.A. i tegoroczny zagraniczny staż naukowy w Technical University of Cluj-Napoca w Rumunii, pozwoliły mi na przeprowadzenie badań związanych z diagnostyką maszyn w układach pojazdów z napędem elektrycznym. Jest to jeden z kierunków badań, który chciałbym kontynuować w dalszej mojej pracy naukowo-badawczej.

Powyżej opisane prace badawcze w przemyśle były możliwe dzięki umiejętnościom i doświadczeniu nabytemu podczas badań laboratoryjnych wykonanych na Politechnice Krakowskiej.

Od roku 2006 sukcesywnie budowałem Laboratorium Monitoringu i Diagnostyki Maszyn i Urządzeń Elektrycznych wchodzące w skład Instytutu Elektromechanicznych Przemian Energii Politechniki Krakowskiej. Mimo ograniczonych środków finansowych zbudowałem nowoczesne laboratorium badawczo-dydaktyczne. Aktualnie w Laboratorium znajduje się kilka stanowisk umożliwiających wykonanie zaawansowanych badań w zakresie diagnostyki maszyn elektrycznych. Pierwsze stanowisko pomiarowe z czterema silnikami indukcyjnymi o mocy 0.8 kW umożliwia badania zwarć zwojowych w stojanie oraz badanie uszkodzeń klatek wirników. Trzy z nich to silniki o różnorodnych uszkodzeniach klatki wirnika (1, 2, 3 uszkodzone pręty) a czwarty silnik z wyprowadzonymi odczepami z uzwojeń posiada możliwość zadawania zwarć. Tak przygotowany zestaw umożliwia uzyskanie dużej liczby kombinacji różnych typów zwarć z jednoczesną możliwością łączenia uzwojeń w gałęzie równoległe. Widok elementów stanowiska przedstawiono na Rys. 1.

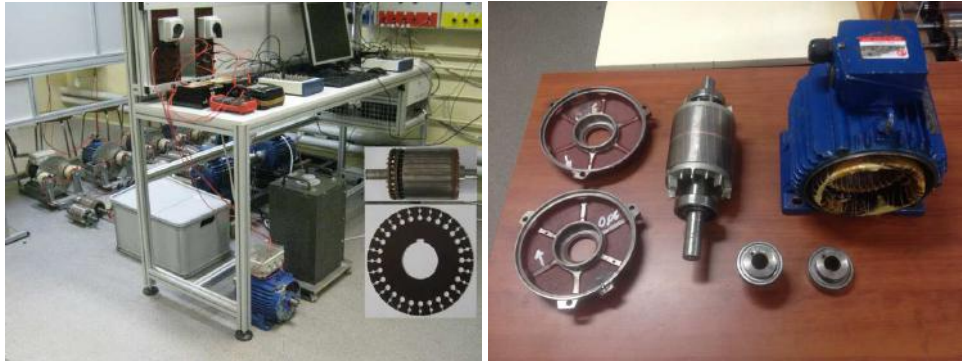


*Rys. 1. Widok elementów stanowiska do badania uszkodzeń silników o mocy 0.8 kW*

Kolejnym przygotowanym przeze mnie stanowiskiem badawczym jest układ z silnikiem indukcyjnym o mocy 4 kW. Stanowisko to zawiera zestaw wymiennych wirników (w tym prototypowe wirniki z wykręcanymi prętami) oraz elementy do realizacji ekscentryczności. Stojan maszyny posiada wyprowadzone odczepy służące do konfiguracji różnych rodzajów zwarć i daje możliwość łączenia uzwojeń w wybrane konfiguracje gałęzi równoległych, co pozwala na prowadzenie badań dla silników o różnych cechach konstrukcyjnych stojana (silniki bez i z gałęziami równoległymi) i wirnika (silniki jednoklatkowe i dwuklatkowe). Stanowisko zostało wyposażone w przetworniki do pomiarów prądów i napięć, momentomierz, zewnętrzne sondy pomiarowe, cewki Rogowskiego oraz cewki do pomiarów strumienia poosiowego. Widok stanowiska przedstawiono na Rys. 2 i 3.



*Rys. 2. Widok elementów stanowiska do badania uszkodzeń silników o mocy 4 kW*



*Rys. 3. Widok elementów stanowiska do badania uszkodzeń silników o mocy 4 kW oraz kompletu elementów do realizacji ekscentryczności*

W laboratorium istnieje możliwość zadawania dowolnego poziomu obciążenia silnika o różnym charakterze zmian w czasie. Do tego celu przygotowany został układ hamowania odzyskowego dwóch silników połączonych mechanicznie wspólnym wałem: tj. silnika badanego oraz silnika stanowiącego obciążenie. Silnik stanowiący obciążenie zasilany jest z falownika napięcia i posiada opcję zwrotu energii do sieci. Poziom obciążenia o różnym charakterze zmian w czasie jest zadawany z panelu operatorskiego połączony z falownikiem napięcia. Dla bardziej złożonych zmian momentu obciążenia, generacja wzorca zmian odbywa się on-line z komputera sterującego. Układ ten daje możliwość zadawania kilku poziomów ekscentryczności statycznej i dynamicznej oraz ekscentryczności mieszanej (równoczesne występowanie obu typów ekscentryczności). Dostępnych jest kilka wymiennych wirników z uszkodzonymi kłatkami oraz cztery prototypowe wirniki z wykręcanymi prętami klatki. Dodatkowo dostępne są dwa zmodyfikowane stojany silnika z możliwością symulowania zwarć oraz łączenia uzwojeń stojana w gałęzie równoległe. Widok tych elementów przedstawiono na Rys.4.



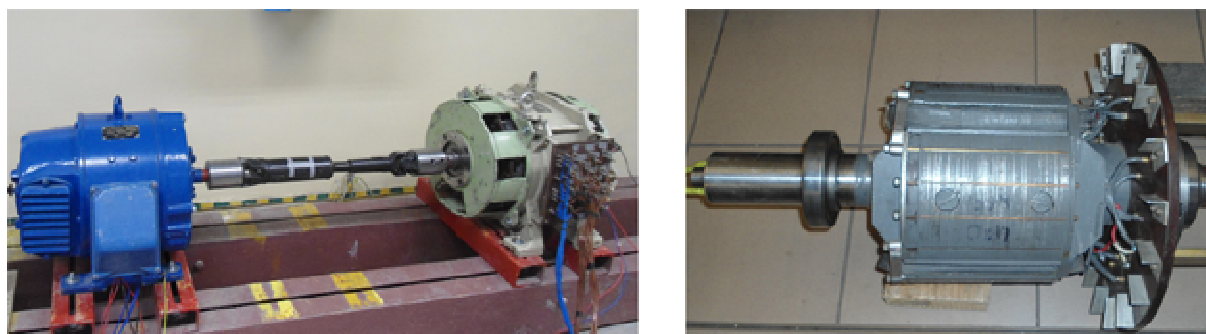
*Rys. 4. Widok elementów stanowiska do badania uszkodzeń silników o mocy 4 kW ze zmodyfikowanymi stojanami silnika do symulacji zwarć oraz zestawionym układem pomiarowym*

Ponadto, dla badanego silnika indukcyjnego dostępnych jest kilkanaście różnie uszkodzonych łożysk. Część z nich to specjalnie spreparowane precyzyjnymi narzędziami szlifierskimi uszkodzenia bieżni zewnętrznej, bieżni wewnętrznej lub kulek. Rys. 5 przedstawia widok łożysk tocznych do badań oraz wzbudnik drgań.



*Rys. 5. Widok łożysk tocznych do badań oraz wzbudnika drgań*

Badania dotyczące diagnostyki maszyn synchronicznych realizowane są w Laboratorium z wykorzystaniem wydawnobiegunowej maszyny o mocy 7.5 kW z klatką rozruchową i gałkami równoległymi w uzwojeniu stojana. Jest to maszyna o specjalnej konstrukcji przystosowanej do badań związanych z nieinwazyjną diagnostyką maszyn synchronicznych. Konstrukcja maszyny synchronicznej pozwala na badanie uszkodzeń związanych z: ekscentrycznością statyczną, dynamiczną i mieszaną, niesymetrią klatki rozruchowej, niesymetrią uzwojeń stojana, niesymetrią uzwojenia wzbudzenia, uszkodzeniem elementów mechanicznych (łożysko, sprzęgła). Rys. 6 przedstawia widok elementów stanowiska do badania maszyny synchronicznej.



*Rys. 6. Widok elementów stanowiska do badania maszyny synchronicznej*

#### **4.3.2. Przedstawienie osiągnięcia naukowego**

Przy pomocy zaprojektowanych i wykonanych stanowisk, zestawu sprzętu laboratoryjnego i pomiarowego przeprowadziłem większość badań do artykułów, które omawiam w osiągnięciu naukowym. Pozostałe wyniki pozyskane zostały z pomiarów przemysłowych maszyn elektrycznych o większych mocach. Wszystkie najważniejsze działania związane z badaniami mogę podzielić na trzy grupy tematyczne, których reprezentatywne artykuły wyróżniłem i zakwalifikowałem w opisanym dalej osiągnięciu naukowym. Ponadto wyróżniłem czwartą grupę tematyczną, gdzie zakwalifikowałem artykuły tematycznie niezwiązane z osiągnięciem naukowym. Grupę tą podzieliłem na podgrupy tematyczne, które dokładniej przedstawiłem w punkcie 5.

Istotną część prowadzonych prac badawczych i realizowanych zadań była inicjowana oraz nadzorowana przeze mnie w odrębnych zespołach w zależności od specyfiki i zakresu prowadzonych badań. Przykładem tego może być seria badań zleczonych przez ABB, których realizacja wymagała zaangażowania zespołu projektowego. Istotnym elementem poprawnego wykonania badań laboratoryjnych oraz późniejszego opracowywania wyników była współpraca pomiędzy współautorami i właściwy podział zadań. Podczas prowadzonych prac bardzo ważne było:

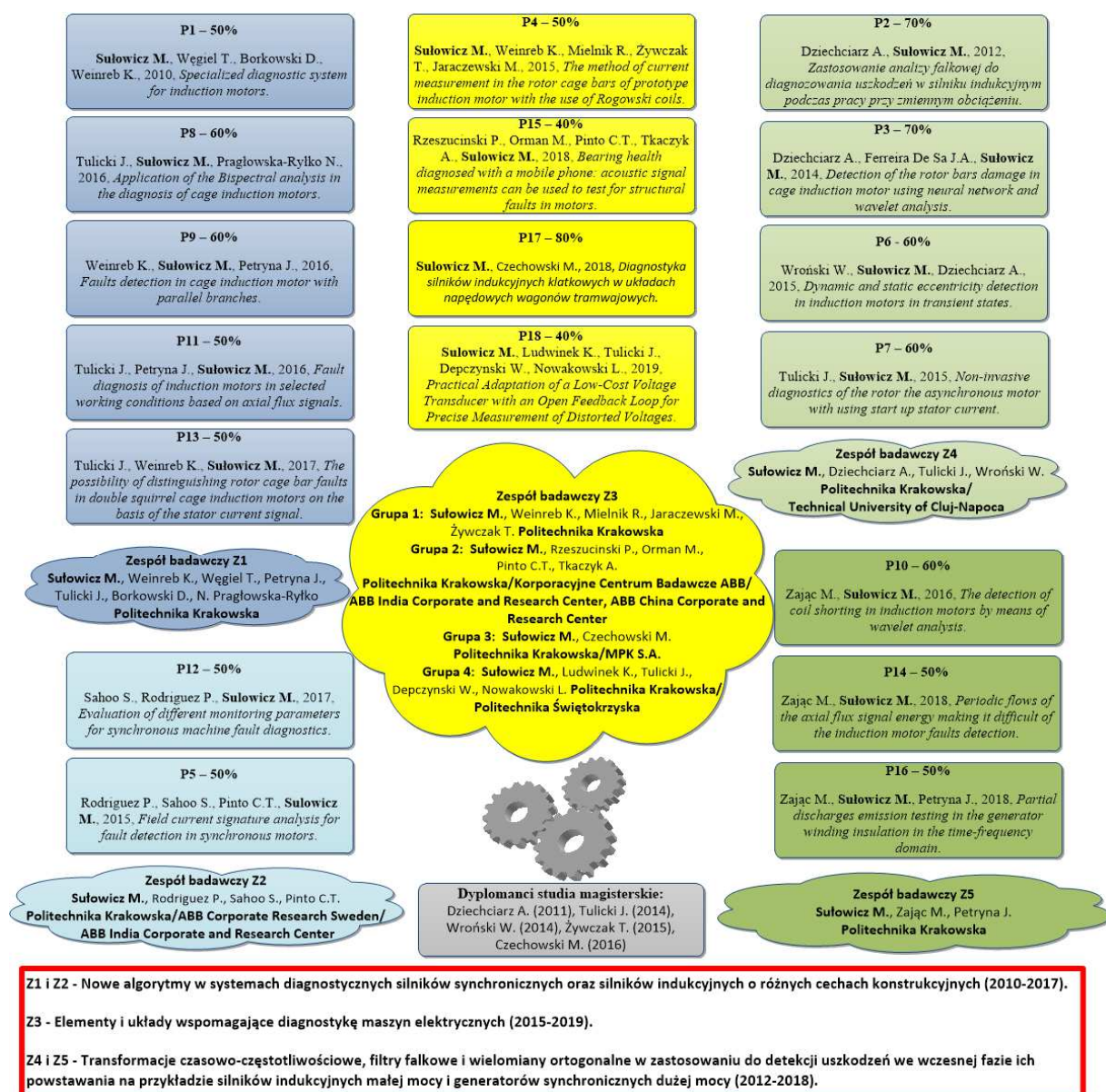
- opracowanie koncepcji i właściwe zaplanowanie przeprowadzenia prac eksperymentalnych,
- zaplanowanie rozbudowy stanowisk i zlecenie wykonania odpowiednich prac,
- bieżąca kontrola realizacji zadań,
- kierowanie pracami badawczymi w taki sposób, aby uzyskać rezultaty nadające się do dalszej analizy wyników badań.

Ważnym aspektem mojej pracy badawczej była więc organizacja i kierowanie prac w ramach różnych zespołów badawczych, które opisałem w dalszej części. Działania te pozwoliły uzyskać pozytywne wyniki badań, które istotnie wpłynęły na przedstawione osiągnięcie naukowe.

Trzy główne kierunki badań związanych z tematyką przedkładanego osiągnięcia naukowego związane z opracowaniem i weryfikacją skutecznych metod i algorytmów diagnostycznych dla oceny stanu technicznego maszyn elektrycznych prądu przemiennego to (Rys. 7):

- nowe algorytmy w systemach diagnostycznych silników synchronicznych oraz silników indukcyjnych o różnych cechach konstrukcyjnych (O1),
- transformacje czasowo-częstotliwościowe, filtry falkowe i wielomiany ortogonalne w zastosowaniu do detekcji uszkodzeń we wczesnej fazie ich powstawania, na przykładzie silników indukcyjnych małej mocy i generatorów synchronicznych dużej mocy (O2),
- elementy i układy wspomagające diagnostykę maszyn elektrycznych (O3).

Na przedkładane osiągnięcie naukowe wybrałem 18 prac opublikowanych w latach od 2010 do 2019. Graficzne przyporządkowanie tych prac do trzech głównych kierunków badań w ramach pięciu zespołów badawczych przedstawiłem na Rys. 7.



Rys. 7. Przyporządkowanie artykułów z osiągnięcia naukowego do wyróżnionych 3 głównych nurtów badań i 5 zespołów badawczych

Pierwszy kierunek badań związany jest z opracowaniem nowych algorytmów w systemach diagnostycznych silników synchronicznych oraz silników indukcyjnych o różnych cechach konstrukcyjnych. Badania te i przygotowanie publikacji realizowałem w dwóch zespołach badawczych w latach 2010-2017. Pierwszy zespół badawczy oznaczony jako Z1 to zespół, który pod moim kierownictwem realizował prace związane z opracowywaniem skutecznych metod diagnostycznych dla silników indukcyjnych o różnych cechach konstrukcyjnych [P1], [P8], [P9], [P11], [P13]. W skład tego zespołu wchodził pracownicy Politechniki Krakowskiej: dr hab. inż. Konrad Weinreb, prof. PK; dr hab. inż. Tomasz Węgiel, prof. PK; dr inż. Janusz Petryna; dr hab. inż. Dariusz Borkowski; mgr inż. Jarosław Tulicki oraz mgr inż. Natalia Radwan-Pragłowska. W ramach prac w koordynowanym przeze mnie zespole prowadziliśmy badania związane z opracowaniem systemu diagnostycznego dla silników indukcyjnych [P1]. Rozwijaliśmy również algorytmy diagnostyczne dla silników indukcyjnych z gałęziami równoległymi [P9] oraz dla silników dwuklatkowych [P13]. Od roku 2013 z dr. inż. Januszem Petryną, dr. inż. Arkadiuszem Dudą, mgr. inż. Krzysztofem Guźcem oraz dwa lata później z mgr. inż. Jarosławem Tulickim rozpoczęliśmy prace związane z zastosowaniem sygnału strumienia poosiowego, zwanego również w literaturze zamiennie strumieniem unipolarnym, do bezinwazyjnej diagnostyki silników indukcyjnych. Artykuł opisujący zastosowanie strumienia poosiowego do diagnostyki wybranych uszkodzeń silnika indukcyjnego przedstawiono w pracy [P11]. Bazując na mojej koncepcji oraz pod moją inspiracją w artykule [P8] przedstawiona została tematyka efektywności zastosowania: bispectrum, jako reprezentatywnej metody analiz widmowej wyższych rzędów do rozróżniania uszkodzeń na podstawie sygnałów prądu stojana, napięcia proporcjonalnego do strumienia unipolarnego, sygnału drganiowego oraz ciśnienia akustycznego.

W drugim zespole badawczym Z2 uczestniczyli pracownicy dwóch Centrów Badawczych ABB ze Szwecji i Indii. Zespół ten zawiązał się przy okazji realizacji prac badawczych dla ABB Corporate Research Sweden. W skład tego zespołu weszli Ph.D. Eng. Pedro Rodriguez, Ph.D. Eng. Subrat Sahoo z ABB Corporate Research Sweden oraz Ph.D. Eng. Cajetan T. Pinto z ABB India Corporate and Research Center. W tym zespole realizowaliśmy badania dla silników synchronicznych. Obiektem badań była maszyna synchroniczna (Rys. 6) pracująca jako silnik. W artykule [P5] z mojej inspiracji i na podstawie mojej koncepcji rozpoznano i opisano możliwość zastosowania tylko i wyłącznie prądu wzbudzenia jako sygnału pozwalającego diagnozować stan techniczny silnika synchronicznego. W kolejnym artykule [P12] przedstawiliśmy porównania skuteczności oceny różnych uszkodzeń silnika synchronicznego przez analizę sygnałów: prądu w gałęziach równoległych, prądów fazowych, prądów cyrkulacyjnych, prądu wzbudzenia i napięcia wałowego. Prace w tych dwóch zespołach badawczych Z1 i Z2 były ukierunkowane na opracowanie, skutecznych i użytecznych metod oceny stanu maszyn prądu przemiennego pracujących jako silnik w ustalonym stanie pracy.

Drugi kierunek badań związany był z transformacjami czasowo-częstotliwościowymi, filtrami falkowymi i wielomianami ortogonalnymi w zastosowaniu do detekcji uszkodzeń we wczesnej fazie ich powstawania na przykładzie silników indukcyjnych, który realizowałem w dwóch kolejnych zespołach badawczych Z4 i Z5 w latach 2012-2018. Zespół badawczy Z4 składał się z dyplomantów, którzy pod moją opieką zrealizowali prace magisterskie. W skład tego zespołu wchodził mgr inż. Arkadiusz Dziechciarz (2011 r.), mgr inż. Jarosław Tulicki (2014 r.) oraz mgr inż. Wojciech Wroński (2014 r.). W nawiasach podałem rok obrony pracy magisterskiej. Na podstawie mojej koncepcji i pod moim kierownictwem opracowaliśmy skuteczne metody diagnostyki dla silników indukcyjnych podczas rozruchu oraz pracy przy zmiennym obciążeniu [P2], [P3], [P6], [P7]. Mgr inż. Arkadiusz Dziechciarz od roku 2013 przebywał w Rumunii w Technical University of Cluj-Napoca w ramach projektu ADEPT (Marie Curie ITN). Podczas jego pobytu w Rumunii nasza współpraca była w dalszym ciągu kontynuowana, wyniki tych prac podano w [P6].

Zespół badawczy Z5 pod moim kierownictwem opracował trzy artykuły [P10], [P14], [P16]. W skład zespołu, który zainspirowałem do podjęcia tematyki wczesnej detekcji powstawania zwarć w uzwojeniach stojana [P10], [P14] oraz uszkodzeń układu izolacyjnego w maszynach wysokonapięciowych [P16], wchodził pracownicy Politechniki Krakowskiej dr hab. inż. Mieczysław Zajac, prof. PK oraz dr inż. Janusz Petryna. Do opracowania skutecznych algorytmów diagnostycznych wykorzystaliśmy filtry falkowe i wielomiany ortogonalne w zastosowaniu do

wczesnej detekcji uszkodzeń stojana dla niskonapięciowych silników indukcyjnych [P10], [P14] oraz wysokonapięciowych generatorów synchronicznych dużej mocy [P16].

Trzeci kierunek badawczy dotyczący elementów i układów wspomagających diagnostykę maszyn elektrycznych realizowałem w jednym dużym zespole badawczym Z3 w latach 2015-2019. W zespole tym wyróżniłem cztery grupy badawcze i w każdej z tych grup byłem osobą wiodącą. W pierwszej grupie badawczej G1 wspólnie z dr hab. inż. Konradem Weinrebem, prof. PK; dr inż. Ryszardem Mielnikiem; dr inż. Marcinem Jaraczewskim (pracownicy Politechniki Krakowskiej) oraz moim dyplomantem mgr. inż. Tomaszem Żywczakiem (2015 r.) przeprowadziłem badania, których celem były obliczenia numerycznie i weryfikacja eksperymentalna rozptywu prądów w prętach klatki wirnika silnika indukcyjnego [P4].

Z drugą grupą badawczą G2, w której uczestniczyli: dr inż. Paweł Rzeszuciński, dr inż. Maciej Orman, Ph.D. Eng. Cajetan T. Pinto, mgr inż. Agnieszka Tkaczyk, podjęliśmy prace badawcze związane z zastosowaniem smartfonów i czujników w nich zabudowanych do rejestracji danych na potrzeby diagnostyki stanu maszyn elektrycznych. W pracy [P15] przedstawiono, na jakie ograniczenia można napotkać przy wykorzystaniu smartfonów i czujników w nich zabudowanych oraz jak skutecznie rozróżnić uszkodzenia poszczególnych elementów łożyska tocznego stosując analizę widmową wyższych rzędów - bispectrum. Ten temat badawczy był realizowany przy współudziale pracowników Politechniki Krakowskiej oraz Korporacyjnego Centrum Badawcze ABB, ABB India Corporate and Research Center i ABB China Corporate and Research Center.

W trzeciej grupie badawczej G3 pod moim kierownictwem wspólnie ze współautorem publikacji [P17] mgr inż. Mirosławem Czechowskim pracownikiem Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego S.A. w Krakowie, opracowaliśmy metodę badania napędów wagonów tramwajowych oraz zweryfikowaliśmy ją dla kilkunastu silników o mocy powyżej 100 kW podczas jazd testowych w różnych porach roku. Na podstawie tych badań zaproponowałem wskaźniki, które można wykorzystać do oceny stanu klatki oraz układu izolacyjnego silników pracujących w układach napędowych wagonów tramwajowych zasilanych z falowników napięcia.

W czwartej grupie badawczej G4 w ramach współpracy pomiędzy Politechniką Krakowską i Politechniką Świętokrzyską, zapoczątkowanej podczas mojego stażu naukowego w Kielcach, wspólnie z dr. hab. inż. Krzysztofem Ludwinkiem, prof. PŚk.; mgr. inż. Jarosławem Tulickim oraz dr. inż. Wojciechem Depczyńskim i dr. inż. Łukaszem Nowakowskim z Politechniki Świętokrzyskiej opracowaliśmy koncepcję i zrealizowaliśmy praktycznie układ wykonany z przetworników z rdzeniem ferromagnetycznym do pomiaru napięcia odkształconego [P18]. Układ ten może mieć szczególnie zastosowanie w diagnostyce odkształconych napięć zasilania maszyn elektrycznych a opracowana metoda pozwala na pomiary zarówno napięć stałych jak i przemiennych silnie odkształconych, jak i o dużych stromościach np. na wyjściu falownika zasilającego silnik indukcyjny. Na każdym etapie przygotowywania pracy [P18] byłem osobą wiodącą w grupie G4.

*Podsumowując chciałbym zaakcentować, że wyniki przeprowadzonych badań i analiz zawartych w przedstawionym cyklu 18 publikacji jako osiągnięcie naukowe:*

*„Opracowanie i weryfikację skutecznych metod i algorytmów diagnostycznych dla oceny stanu technicznego maszyn prądu przemiennego”*

*w większości przypadków posiadają aspekty praktyczne i zostały zweryfikowane eksperymentalnie również w warunkach przemysłowych. Dla opracowanych metod diagnostycznych używałem opracowanych autorsko elementów i układów wspomagających. Wyróżniając umownie trzy główne kierunki badań, należy podkreślić, że większość przedstawionych artykułów przenika się tematycznie i dotyczy więcej niż jednego głównego kierunku badań, stąd też kompleksowe ich zestawienie składa się na jedno całościowo spójne osiągnięcie naukowe.*

#### 4.3.3. Omówienie osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania, w tym omówienie oryginalnych osiągnięć o charakterze konstrukcyjnym, technologicznym lub projektowym

Na przedkładane osiągnięcie naukowe pt. „Opracowanie i weryfikacją skutecznych metod i algorytmów diagnostycznych dla oceny stanu technicznego maszyn elektrycznych prądu przemiennego” składają się powiązane tematycznie następujące kierunki badań:

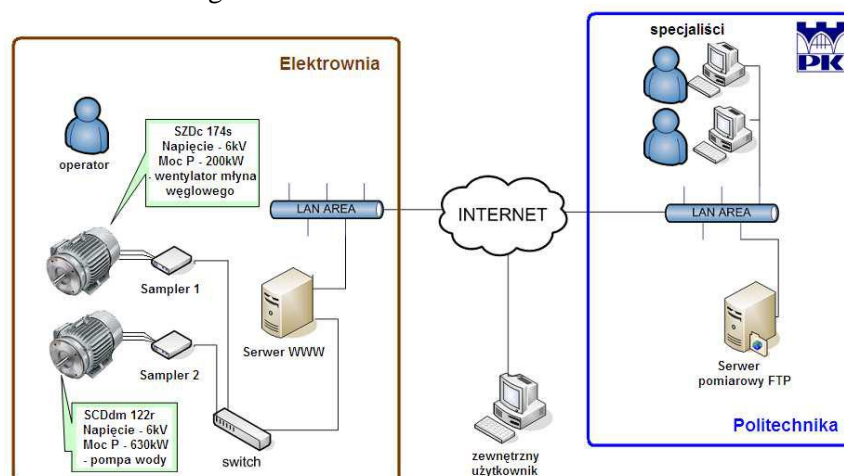
- *nowe algorytmy w systemach diagnostycznych silników synchronicznych oraz silników indukcyjnych o różnych cechach konstrukcyjnych (O1),*
- *transformacje czasowo-częstotliwościowe, filtry falkowe i wielomiany ortogonalne w zastosowaniu do detekcji uszkodzeń we wczesnej fazie ich powstawania, na przykładzie silników indukcyjnych małej mocy i generatorów synchronicznych dużej mocy (O2),*
- *elementy i układy wspomagające diagnostykę maszyn elektrycznych (O3).*

Z każdym z w.w. kierunków badań związane są zagadnienia i artykuły stanowiące przedkładane osiągnięcie naukowe, których opis przedstawiono poniżej.

#### *O1. Nowe algorytmy w systemach diagnostycznych silników synchronicznych oraz silników indukcyjnych o różnych cechach konstrukcyjnych*

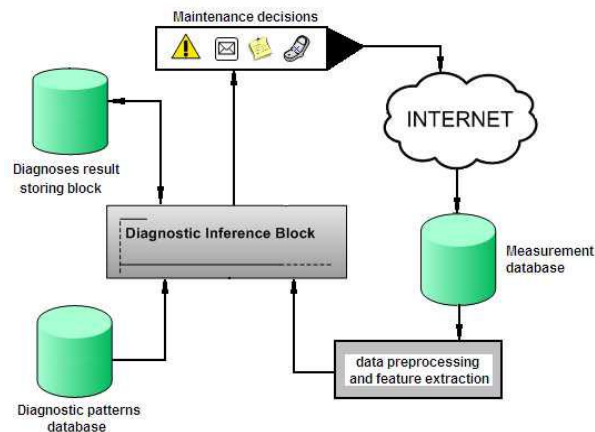
#### Systemy monitoringu i diagnostyki dla maszyn prądu przemiennego

Systemy monitoringu i diagnostyki stanu maszyn, podczas normalnej eksploatacji, są ważnymi elementami poprawiającymi niezawodność pracy całego układu napędowego i rzutującymi na efektywność procesów technologicznych. W artykule [P1] przedstawiono praktyczną realizację rozproszonego systemu diagnostycznego. Dla przeprowadzenia na potrzebę wykonania zdalnych pomiarów w jednej z polskich elektrowni został zainstalowany prototyp modułu tele-pomiarowego. Ciągłym monitoringiem stanu w systemie objęto dwa silniki indukcyjne napędzające odpowiednio: wentylator młyna węglowego SZDc 174s o mocy 200kW oraz pompę wody SCDdm 122r o mocy 630 kW. Struktura zainstalowanego systemu oparta została na dwóch odrębnych sieciach lokalnych: elektrowni i Politechniki Krakowskiej połączonych Internetem. Do lokalnej sieci elektrowni został dołączony system pomiarowy składający się z czujników pomiarowych LEM, urządzeń SAMPLER, switcha łączącego dwa segmenty sieci komputerowej oraz serwerów. Na rys.8. przedstawiono strukturę systemu zainstalowanego w elektrowni.



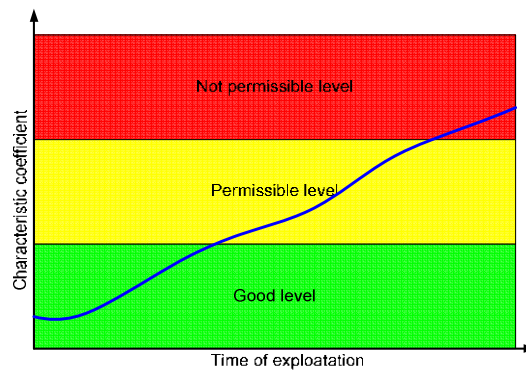
Rys. 8. Struktura systemu zainstalowanego w elektrowni

Po stronie Politechniki zaimplementowano tzw. Centrum Diagnostyczne do oceny stanu technicznego nadzorowanych maszyn. Ideę Centrum Diagnostycznego przedstawiono na Rys.9 [P1].



Rys. 9. Schemat ideowy głównych bloków systemu diagnostycznego [P1]

Kluczowym elementem systemu wnioskowania diagnostycznego był moduł oparty na sieciach neuronowo-rozmytych typu TSK.



Rys. 10. Przykładowy zmian współczynnika diagnostycznego [P1]

Podstawą określenia bazy reguł dla systemu wnioskowania było przyjęcie trzech poziomów zmian charakterystycznych wskaźników dla poszczególnych wejść systemu wnioskowania (od  $x_1$  do  $x_4$ ): dobry (A), dopuszczalny (B), niedopuszczalny (C).

Ogólna postać bazy reguł została zapisana w poniższy sposób:

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } A_2 \text{ if } x_3 \text{ is } A_3 \text{ and } x_4 \text{ is } A_4 \text{ then } y=f(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (1)$$

Liczba reguł wnioskowania rozmytego zawiera kombinacje wszystkich dopuszczalnych poziomów wartości wskaźników dla czterech poszczególnych wejść. Łącznie jest to 48 reguł.

Sygnal na wyjściu systemu został określony wzorem:

$$y = a_0 + k_n a_1 + k_d a_2 + k_s a_3 + k_r a_4 \quad (2)$$

gdzie:

- $k_n$  – współczynnik dla asymetrii napięcia,
- $k_d$  – współczynnik dla ekscentryczności dynamicznej,
- $k_s$  – współczynnik dla ekscentryczności statycznej,
- $k_r$  – współczynnik dla uszkodzenia klatki.

Tak zdefiniowany algorytm wnioskowania diagnostycznego można dowolnie rozbudować o nowe wskaźniki, których uwzględnienie w systemie wnioskowania będzie wymagało ustalenia i zapisania na nowo bazy reguł wnioskowania.

W dalszej części zostaną przedstawione nowe wskaźniki dla maszyn indukcyjnych o specjalnych cechach konstrukcyjnych, dla których bazę reguł systemu wnioskowania można zbudować na podobnych zasadach.



## Metoda wczesnego wykrywania uszkodzeń silników indukcyjnych z gałęziami równoległymi w uzwojeniu stojana

Według różnych opinii można spotkać się ze stwierdzeniem, że nawet ponad 50% maszyn elektrycznych dużej mocy pracujących w przemyśle ma gałęzie równoległe w stojanie. Przerwa lub zwarcie zwojów w gałęzi przekłada się bardzo niekorzystnie na własności ruchowe danej maszyny i prowadzi nieuchronnie do jej awarii. Bardzo ważne jest znalezienie takich metod i symptomów, które pozwolą określić uszkodzenie maszyny na wczesnym etapie jego powstawania.

Przedmiotem pracy [P9] jest analiza efektywności wczesnego wykrywania uszkodzenia uzwojenia stojana z dwiema gałęziami równoległymi w silniku indukcyjnym klatkowym, poprzez ocenę zmian w przebiegach prądów gałęziowych w ustalonym stanie pracy. Za wskaźniki oceny zostały przyjęte harmoniczne widma Fouriera prądu cyrkulacyjnego, zdefiniowanego jako różnica wartości chwilowych prądów w gałęziach uzwojenia.

Ocenę uszkodzenia uzwojenia stojana, klatki wirnika oraz szczeliny powietrznej oparto o analizę zmiany amplitud wybranych harmonicznych widm prądu fazowego i prądów gałęzi równoległych uzwojenia stojana, charakteryzujących naruszenie stanu symetrii tych obwodów. Z mnogości zauważalnych w widmie prądu harmonicznych, do oceny diagnostycznej tego silnika zostały wybrane harmoniczne:

- o częstotliwościach zasilania  $f_0$  i  $3f_0$
- poślizgowe o częstotliwościach związanych z poślizgiem  $s$ , w tym:

- podstawowa harmoniczna żłobkowa:

$$f_{PSH} = gN_r f_r + f_0 \quad (3)$$

- harmoniczna żłobkowa, świadcząca o wystąpieniu niesymetrii uzwojenia stojana lub ekscentryczności statycznej:

$$f_{SH} = gN_r f_r - f_0 \quad (4)$$

- harmoniczna, świadcząca o uszkodzeniu klatki lub wystąpieniu ekscentryczności dynamicznej:

$$f_{dyn} = (1-2s) f_0 \quad (5)$$

- harmoniczne, świadczące o jednoczesnym wystąpieniu kilku rodzajów niesymetrii, w tym ekscentryczności mieszanej:

$$f_{mix} = f_0 \pm f_r \quad (6)$$

gdzie:  $f_r = n/60$  - częstotliwość wirnika.

Jako reprezentatywny do zobrazowania zmian wskaźnika od poziomu uszkodzenia wybrano przypadek zmian harmonicznych prądu fazowego i prądu cyrkulacyjnego dla odłączenia pewnej części zwojów w zezwoju jednej cewki. W tabeli 1 i 2 zestawiono odpowiednio wybrane harmoniczne.

Tabela 1. Zestawienie amplitud harmonicznych prądu fazowego przy odłączeniu zwojów

$f_{har}$ [Hz]	Amplituda harmonicznej prądu fazowego [dB] dla liczby odłączonych zwojów w zezwoju w [%]					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
<b>26.6</b>	<b>38.5</b>	<b>44.5</b>	<b>48.5</b>	<b>50.5</b>	<b>51.5</b>	<b>52.5</b>
43.5	64	63.5	62	62	61.5	60
50	92.5	93	93	92.5	93	93
<b>73.4</b>	<b>32</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>49</b>	<b>52.5</b>	<b>54</b>
150	48	47.5	47.5	51	53.5	55.5
<b>978</b>	<b>6</b>	<b>16.5</b>	<b>21</b>	<b>24.5</b>	<b>26.5</b>	<b>27</b>
1078	36	37.5	36.5	34	32.5	29.5

Tabela 2. Zestawienie amplitud harmonicznych prądu cyrkulacyjnego przy odłączeniu zwojów

$f_{har}$ [Hz]	Amplituda harmonicznej prądu cyrkulacyjnego [dB] dla liczby odłączonych zwojów w [%]					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
26.6	61.5	60	60	60	60	59.5
<b>43.5</b>	<b>27.5</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>44.5</b>	<b>46.5</b>	<b>46.5</b>
<b>50</b>	<b>41</b>	<b>69</b>	<b>75.5</b>	<b>79</b>	<b>81.5</b>	<b>83</b>
73.4	63.5	65	64	64	64,5	64
<b>150</b>	<b>35</b>	<b>44</b>	<b>49.5</b>	<b>52</b>	<b>54</b>	<b>54.5</b>
<b>978</b>	<b>3.5</b>	<b>17.5</b>	<b>24</b>	<b>27.5</b>	<b>28</b>	<b>28</b>
<b>1078</b>	<b>9.5</b>	<b>18.5</b>	<b>26</b>	<b>28.5</b>	<b>31</b>	<b>31.5</b>

Porównanie wpływu wzrostu liczby odłączonych zwojów w zezwoju na zmianę amplitud wybranych harmonicznych prądu fazowego i prądu cyrkulacyjnego, przedstawionych w Tabeli 1 i 2 prowadzi do następujących spostrzeżeń:

- w widmie prądu fazowego wzrastają amplitudy harmonicznych: żłobkowej oraz o częstotliwościach właściwych dla ekscentryczności mieszanej;
- w widmie prądu cyrkulacyjnego istotnie wzrastają, tak jak dla symetrycznej klatki, amplitudy harmonicznych: podstawowej, trzeciej i obu harmonicznych żłobkowych oraz dodatkowo harmoniczna o częstotliwości  $(1-2s)f_0$ .

Amplitudy tych harmonicznych mogą być dobrym wskaźnikiem uszkodzenia szczególnie w przypadku przerwy w jednej z gałęzi.

## Metoda rozróżniania uszkodzenia danej klatki w silniku indukcyjnym dwuklatkowym

Znaczna liczba silników indukcyjnych dużej mocy to silniki dwuklatkowe. Przy remoncie wirnika dostęp do klatki pracy może być ograniczony co bardzo utrudnia dokładne zdiagnozowanie jej stanu metodami stosowanymi w zakładach remontowych.



Rys. 10. Wirnika silnika dwuklatkowego 400 kW z uszkodzoną klatką pracy – widok na wirnik przed demontażem klatki rozruchowej (niewidoczne uszkodzenie), po demontażu z widocznym uszkodzeniem połączenia pierścieni zwierający - pręty

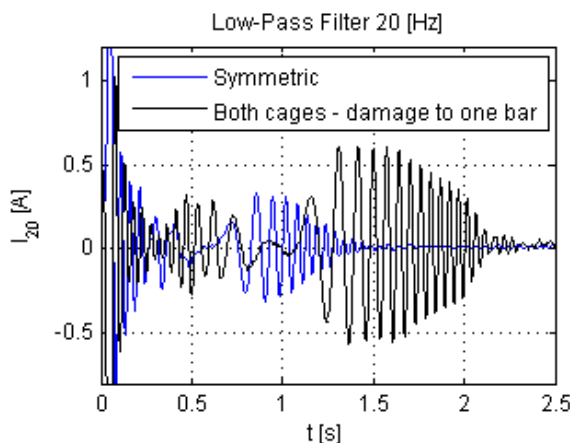
W artykule [P13] zbadano możliwości wykorzystania przebiegu prądu fazowego stojana w diagnostyce uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego dwuklatkowego. Analizie poddano przebiegi prądu podczas rozruchu i w stanie pracy ustalonej, dla różnych wariantów zadawanego uszkodzenia obu klatek wirnika.

Do oceny stanu klatek przyjęto wskaźniki asymetrii obwodów wirnika:  $K$  i  $(I_s / I_{50})$ , przy czym:

$$\frac{I_s}{I_{50}} = 10^{\frac{-K}{20}} \cdot 100\% \quad (7)$$

gdzie:  $K$  – różnica amplitud harmonicznej podstawowej i harmonicznej diagnostycznej (w skali decybelowej);  $I_s$  – amplituda harmonicznej diagnostycznej (A);  $I_{50}$  – amplituda harmonicznej podstawowej (sieciowej) prądu fazowego (A).

Dla przypadku rozruchu w zależności (7) przyjmujemy  $I_s = I_{20}$ , a w stanie ustalonym  $I_s = I_{1-2s}$ , gdzie:  $I_{1-2s}$  jest amplitudą harmonicznej prądu o częstotliwości  $(1-2s)f_0$ . W przypadku rozruchu stosunek  $I_{20} / I_{50}$ , nie powinien przekroczyć 0.8% wartości wyznaczonej dla maszyny z symetrycznym wirnikiem, co ilustruje rys.11.



Rys. 11. Przebiegi sygnału prądu rozruchowego po filtracji dla silnika symetrycznego i z uszkodzeniem pręta w klatce rozruchowej oraz klatce pracy [P13]

W stanie ustalonym pracy, w badaniu asymetrii klatki wirnika, obok różnicy składowej podstawowej oraz poślizgowej, powszechnie zastosowanie znalazł wskaźnik *RFI* (ang. *Rotort Fault Index*). Wskaźnik *RFI* można przedstawić w postaci poniższej zależności [P13]:

$$RFI = \max(I_{s1}, I_{s2} \dots) \cdot p / I_o \quad (8)$$

gdzie:  $I_{s1}, I_{s2} \dots$  - amplituda kolejnej, zgodnie z (1), lewostronnej harmonicznej poślizgowej,  
 $p$  - liczba par biegunów.

Dla silnika dwuklatkowego opisany wskaźnik niesymetrii przyjmuje w czasie trwania rozruchu dwie wartości. Dla poślizgów większych lub równych 0,5, obliczona wartość odnosi się do klatki rozruchowej. Dla prędkości obrotowych powyżej połowy prędkości synchronicznej, wartość przyjętego wskaźnika należy wiązać jednocześnie z oceną symetrii klatki pracy i klatki rozruchowej. Wyniki pomiarów oraz obliczeń dla wybranych przypadków niesymetrii klatek wirnika i prądu obciążenia silnika  $I$ , przedstawiono w tabeli 3.

Tabela.3. Wyniki pomiarów dla silnika z łącznie uszkodzonymi prętami klatek wirnika

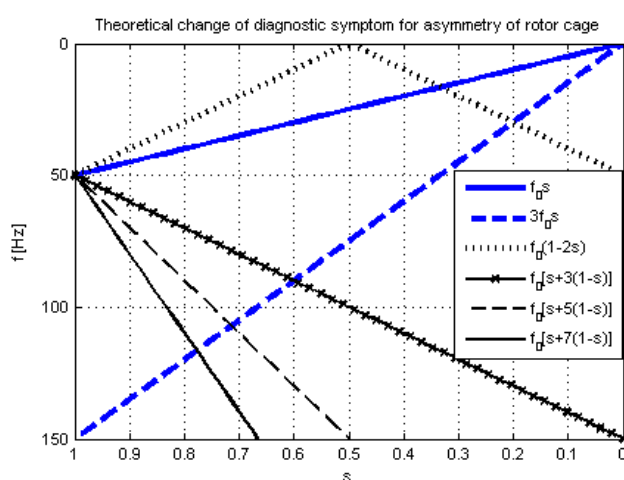
Liczba przerwanych prętów klatki:	$s > 0.5$	$s < 0.5$	$t$ [s]	<i>RFI</i>	$I$ [A]
	$I_{20} / I_{50}$ %	$I_{20} / I_{50}$ %			
górnjej - 1 dolnej - 1	2.27	4.71	3.2	0.92	1.0
	1.53	4.21	3.4	0.99	1.5
	1.48	4.13	4.0	1.12	2.0
	1.49	3.95	4.2	1.15	2.5
górnjej - 2 dolnej - 2	2.28	5.33	3.2	1.13	1.0
	2.46	5.11	3.5	1.15	1.5
	2.47	5.06	4.2	1.14	2.0
	2.43	5.09	4.5	1.15	2.5
górnjej - 3 dolnej - 3	4.22	6.62	3.5	1.22	1.0
	4.21	6.65	4.0	1.25	1.5
	4.15	6.78	4.2	1.25	2.0
	4.10	6.59	4.8	1.24	2.5

Uszkodzenie obwodu klatki pracy ma minimalny wpływ na czas rozruchu. Charakter zmian wartości amplitudy sygnału diagnostycznego w zależności od stopnia niesymetrii klatek wirnika jest nieliniowy oraz zależy od wartości przyłożonego momentu obciążenia.

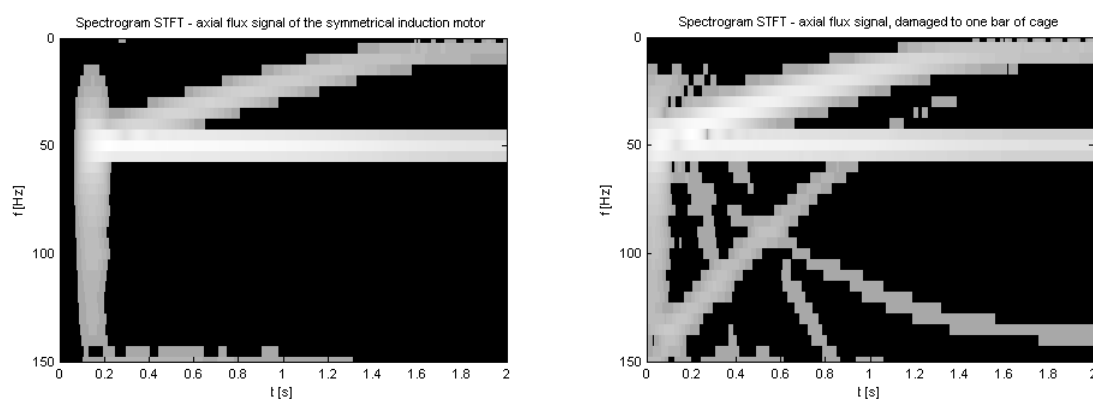
## Wykrywanie uszkodzeń silników indukcyjnych w oparciu o strumień poosiowy

W idealnej maszynie indukcyjnej strumień poosiowy nie powinien występować. W praktyce, zarówno w obwodach stojana jak i wirnika, występują różnego rodzaju asymetrie wynikające z niedokładności geometrycznych w rozmieszczeniu uzwojeń lub niejednorodności materiałów. Wskutek tego typu niedokładności w maszynie powstaje niewielki, ale zauważalny strumień poosiowy. Właśnie ten sygnał strumienia poosiowego może być wykorzystany w diagnozowaniu uszkodzeń zarówno stojana, jak i wirnika maszyny indukcyjnej.

W artykule [P11] przedstawiono możliwość zastosowania sygnału strumienia poosiowego w diagnostyce maszyn indukcyjnych małej mocy, pracujących w stanie ustalonym lub przy zmiennych warunkach obciążenia. Reprezentatywną metodą analizy sygnału strumienia poosiowego jest zastosowanie krótkoczasowej transformacji Fouriera STFT. Poniżej przedstawiono teoretyczne zmiany symptomów diagnostycznych oraz przedstawiono przykłady spektrogramów uzyskanych z sygnału strumienia poosiowego zarejestrowanego w czasie rozruchu dla silnika symetrycznego i silnika z uszkodzonym jednym prętem klatki.



Rys. 12. Teoretyczna zmiana symptomów diagnostycznych dla oceny asymetrii klatki wirnika dla różnych obciążeń silnika [P11]



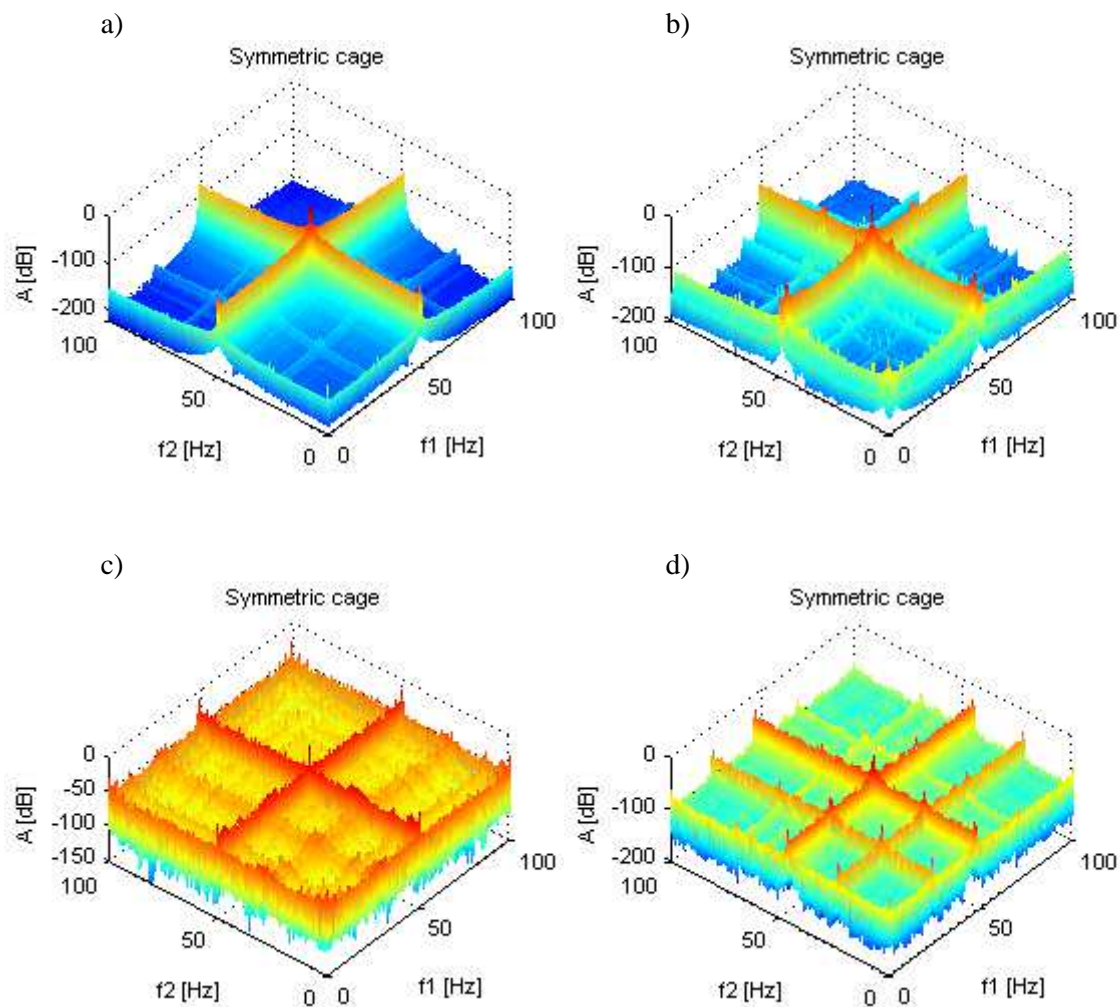
Rys. 13. Spektrogram STFT sygnału strumienia poosiowego dla silnika symetrycznego i z uszkodzonym jednym prętem klatki [P11]

Wśród najważniejszych zalet stosowania sygnału strumienia poosiowego jako sygnału diagnostycznego należy wskazać brak znaczącego wpływu na czytelność spektrogramów takich wielkości fizycznych jak moment obrotowy i częstotliwość zasilania.

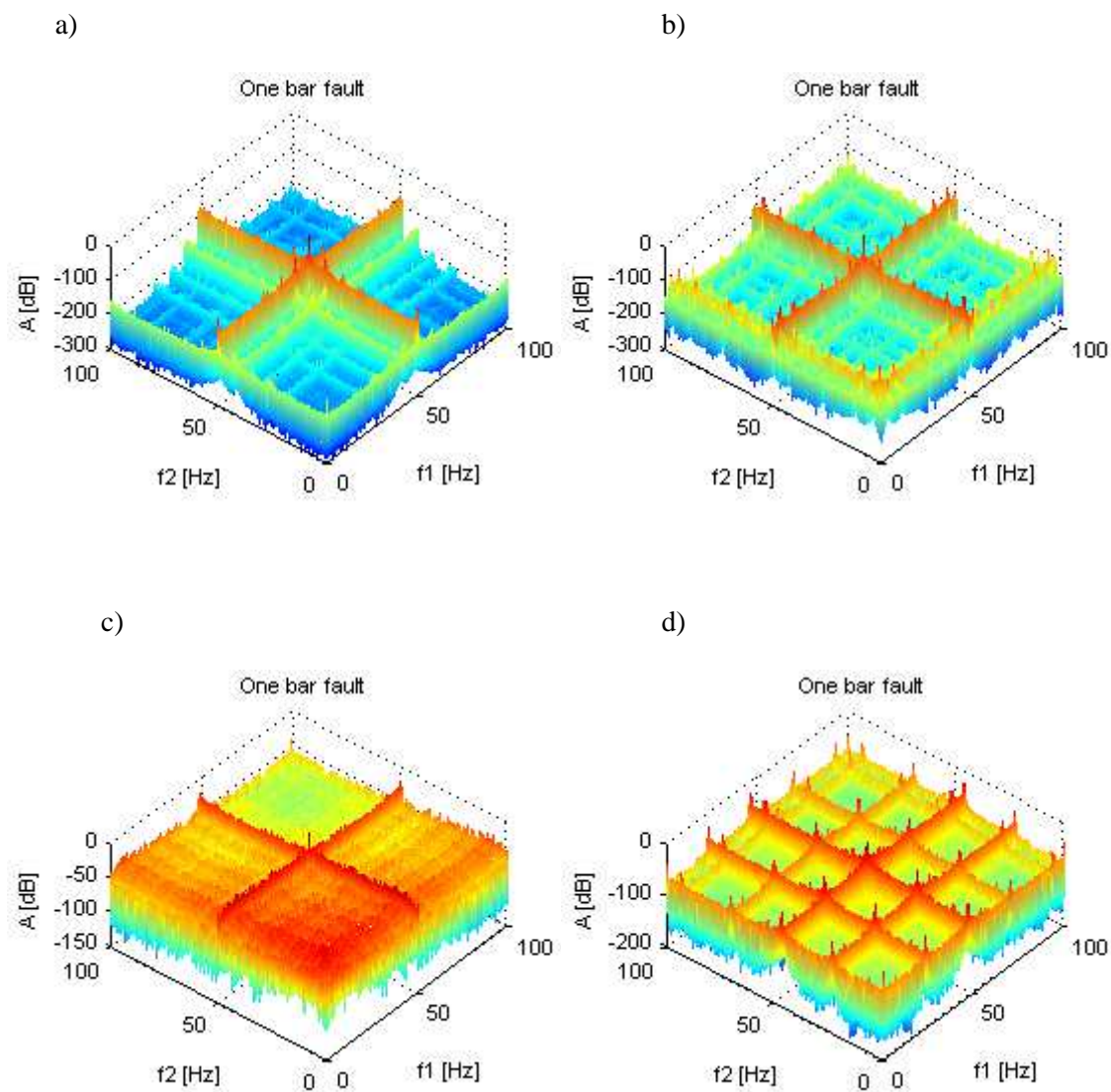
W przebiegu napięcia proporcjonalnego do strumienia poosiowego w stanie nieustalonym i dynamicznym, podobnie jak w analizie prądu stojana, z powodzeniem mogą być stosowane metody nisko częstotliwościowe w analizie porównawczej wahań sygnałów diagnostycznych. Jak wykazano, dokładna obserwacja zmian wybranych sygnałów diagnostycznych jest możliwa szczególnie przy użyciu metod czasowo-częstotliwościowych.

## Porównanie wyników analiz widmowych wyższych rzędów – bispectrum

W artykule [P8] przedstawiono niezbędne podstawy teoretyczne, wyniki analiz oraz najważniejsze spostrzeżenia i wnioski dotyczące zastosowania transformaty bispektralnej (bispectrum) w diagnostyce maszyny indukcyjnej, pracującej w stanie ustalonym. Ocenie poddano efektywność zastosowania bispectrum w analizie sygnałów prądu stojana, napięcia proporcjonalnego do strumienia unipolarnego, drgań na obudowie łożyska oraz ciśnienia akustycznego. Obiektem badań był silnik typu Sg112M-4 o mocy 4kW. Poniżej zestawiono wyniki analiz dla silnika symetrycznego i silnika z uszkodzonym jednym prętem klatki oraz dla wszystkich czterech sygnałów, dla których przeprowadzono analizę.



Rys. 14. Wykres konturowy, silnik z symetryczny, analizowane sygnały: a) prąd stojana; b) strumień poosiowy; c) drgania; d) ciśnienie akustyczne



Rys. 15. Wykres konturowy, silnik z uszkodzonym jednym prętem klatki, analizowane sygnały:  
 a) prąd stojana; b) strumień poosiowy; c) drgania; d) ciśnienie akustyczne

Podsumowując można stwierdzić, że zastosowanie bispectrum do przebiegu prądu lub do pośredniego sygnału strumienia poosiowego w przypadku asymetrii elektrycznej wirnika, nie przynosi dodatkowych korzyści w porównaniu z przekształceniem dwuwymiarowym. Odmienne kształtuje się przypadek dla sygnału akustycznego, gdzie różnice amplitud składowych użytecznych do szumu są nieznaczne, a przekształcenie sygnału w bispectrum pozwala na zdecydowaną poprawę czytelności zawartych składowych w przebiegu.

## Użyteczne wskaźniki do oceny stanu technicznego maszyn synchronicznych

W oparciu o model polowy FEM przeprowadzono analizę uszkodzeń maszyny synchronicznej pracującej jako silnik. Następnie eksperymentalnie zweryfikowano je w laboratorium na specjalnie przygotowanej maszynie synchronicznej. Analizowano sygnały: prądu wzbudzenia [P5], prądu w gałęziach równoległych, prądów fazowych, prądów cyrkulacyjnych i napięcia wałowego jako użytecznego sygnału do wypracowania wskaźnika oceny stanu technicznego silników synchronicznych [P12]. Zbadano zachowanie się tych wskaźników dla zwarć w zwoju uzwojeniu stojana, zwarć zwoju w uzwojeniu wirnika, zwarcia jednej cewki uzwojenia wirnika oraz ekscentryczności statycznej, dynamicznej i mieszanej. Przydatność danego wskaźnika do oceny danego uszkodzenia oceniono jedną, dwoma lub trzema gwiazdkami w zależności od wykrywalności uszkodzeń przy pomocy danego wskaźnika, czułości danego wskaźnika oraz możliwości rozróżniania danego uszkodzenia. Wynik analiz zestawiono w tabeli 4.

Tabela.4. Zestawienie oceny przydatności danego wskaźnika do oceny uszkodzenia

Wskaźnik do oceny → Rodzaj uszkodzenia ↓	Prąd wzbudzenia	Prąd cyrkulacyjny	Prąd fazy stojana	Prąd w gałęzi równoległej	Napięcie wałowe
Zwarty zwój w uzwojeniu stojana	***	***	*	**	***
Zwarty zwój w uzwojeniu wirnika	**	**	*	*	**
Zwarta cewka w uzwojeniu stojana	***	**	*	*	**
Ekscentryczność statyczna	**	**	*	*	*
Ekscentryczność dynamiczna	***	**	**	**	**
Ekscentryczność mieszana	***	**	**	**	***

Z przedstawionego zestawienia można zauważyć, że jednym z najlepszych sygnałów do oceny uszkodzeń maszyny synchronicznej jest prąd wzbudzenia.



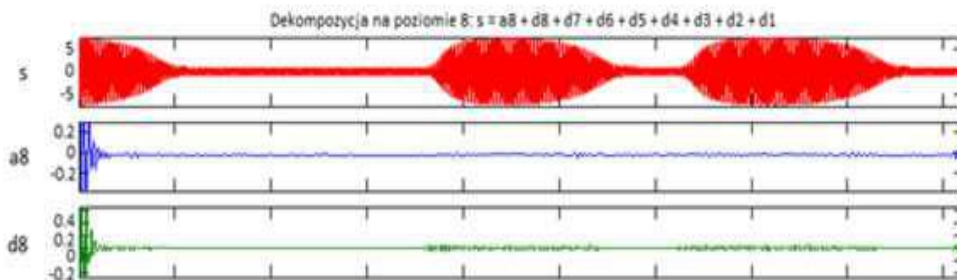
## *O2. Transformacje czasowo-częstotliwościowe, filtry falkowe i wielomiany ortogonalne w zastosowaniu do detekcji uszkodzeń we wczesnej fazie ich powstawania, na przykładzie silników indukcyjnych małej mocy i generatorów synchronicznych dużej mocy*

### **Metody diagnostyki silników indukcyjnych podczas rozruchu oraz pracy przy zmiennym obciążeniu, wykorzystujące transformacje czasowo-częstotliwościowe**

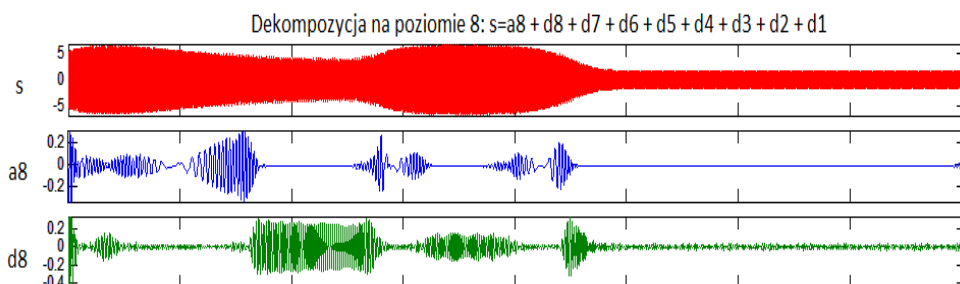
Bardzo dobrym sposobem oceny stanu klatki silników indukcyjnych jest analiza prądu rozruchowego z wykorzystaniem transformacji falkowej lub filtracji cyfrowej. Zaletą tej metody jest to, że można zaobserwować nie tylko obecność symptomów świadczących o uszkodzeniu klatki, lecz także charakter ich zmian w czasie. Jednakże w zależności od częstotliwości przeprowadzania rozruchu silnika sygnał prądu rozruchowego, w przypadku braku specjalistycznych systemów zbierania danych, nie jest dostępny pomiarowo przez cały czas. Ponadto, w zależności od charakteru pracy maszyny, rozruchy mogą być przeprowadzane stosunkowo rzadko, co znacznie ogranicza zastosowanie metody oceny stanu klatki silnika na podstawie analizy prądu rozruchowego. Okazuje się, że charakterystyczne symptomy, które świadczą o uszkodzeniu klatki występują również przy pracy silnika indukcyjnego ze zmiennym momentem obciążenia czemu towarzyszy zmiana prędkości obrotowej (poślizgu). Stany dynamiczne, w których następuje zmiana momentu występują znacznie częściej niż rozruchy silnika, co zwiększa możliwości aplikacji tej metody.

W celu wyodrębnienia charakterystycznych cech z sygnałów, które świadczą o uszkodzeniu klatki przy pracy silnika indukcyjnego ze zmiennym momentem obciążenia, należy w odpowiedniej chwili wyzwolić układ pomiarowy do rejestracji tych sygnałów. Wyzwolenie pomiaru w tej samej chwili czasowej ma na celu uzyskania w miarę podobnych warunków pracy i zmian obciążenia co bardzo ułatwia analizy porównawcze, gdy stosuje się czasowo-częstotliwościowe metody analizy sygnałów.

Na rys. 16 i 17 przedstawiono dekompozycję sygnału prądu stojana, zarejestrowanego podczas pracy silnika zdrowego i z uszkodzeniem, przy zmiennym obciążeniu. Przebiegi prądów na omawianych rysunkach nieco się różnią. Nie wpływa to jednak na przeprowadzenie analiz dla uzyskanych sygnałów, gdyż istotą przeprowadzonych badań było zbadanie występowania symptomów uszkodzenia podczas zmiennych warunków pracy silnika.



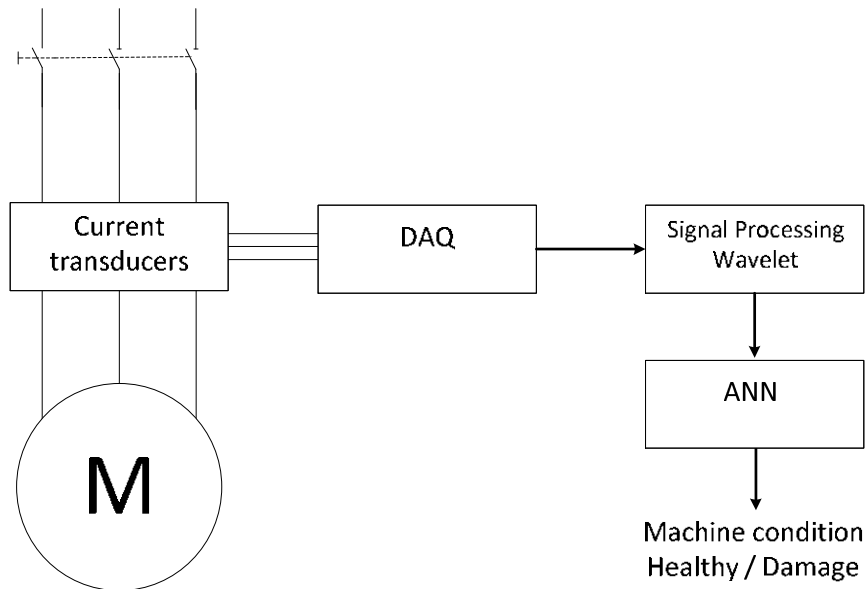
Rys. 16. Dekompozycja sygnału prądu silnika zdrowego na poziomie 8 – zmienne obciążenie [P2]



Rys. 17. Dekompozycja sygnału prądu silnika uszkodzonego na poziomie 8 – zmienne obciążenie [P2]

Zarejestrowanie sygnałów podczas stanu dynamicznej pracy silnika pozwala również diagnozować i wyraźnie rozróżnić symptomy świadczące o uszkodzeniu maszyny.

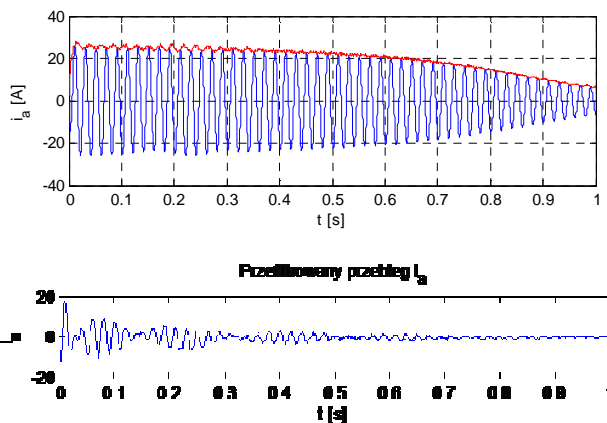
Działanie układu diagnostycznego bazującego na analizie prądu rozruchowego można zautomatyzować stosując automatyczną rejestrację sygnałów, wielorozdzielczą analizę falkową oraz sieć neuronową MLP [P3]. Odpowiednio nauczona sieć neuronowa będzie w stanie określić typ i poziom uszkodzenia. Schematycznie taką strukturę systemu diagnostycznego przedstawiono na rys.18.



Rys. 18. Ilustracja idei działania systemu diagnostycznego opartego o wielorozdzielczą analizę falkową oraz sieć neuronową [P3]

W innym podejściu diagnostycznym zastosowano filtr notch do wstępnej filtracji (kondycjonowania) zarejestrowanego sygnału prądu silnika, w celu zwiększenia selektywności transformacji i lepszego rozróżniania harmonicznych związanych z uszkodzeniami, poprzez usunięcie harmonicznej podstawowej częstotliwości napięcia zasilającego, nie zawierającej symptomów uszkodzeń. Filtr notch, będący filtrem typu IIR, zaprojektowany dla określonej częstotliwości, usuwa konkretną harmoniczną sygnału.

Na rys.19. przedstawiono przykładowy przebieg prądu silnika dla przypadku symetrycznego, z harmoniczną podstawową usuniętą za pomocą dobranego filtru notch. Nie jest to filtracja idealna i harmoniczna podstawowa jest dalej częściowo obecna w analizowanym sygnale.



Rys. 19. Przebieg prądu: zarejestrowanego oraz po zastosowaniu filtru notch [P6]

Za pomocą analiz wykonywanych na płaszczyznach czasowo-częstotliwościowych, przy użyciu transformacji Gabora, STFT Wignera-Ville'a i CWT, udało się zdiagnozować wszystkie rozważane uszkodzenia silnika, dzięki zlokalizowaniu charakterystycznych zależnych od poślizgu harmonicznych, czyli dzięki zastosowaniu wybranej metodologii TMCSA (t.j. ekstrakcji charakterystycznych harmonicznych związanych z uszkodzeniami zależnych od poślizgu na płaszczyznach TF).

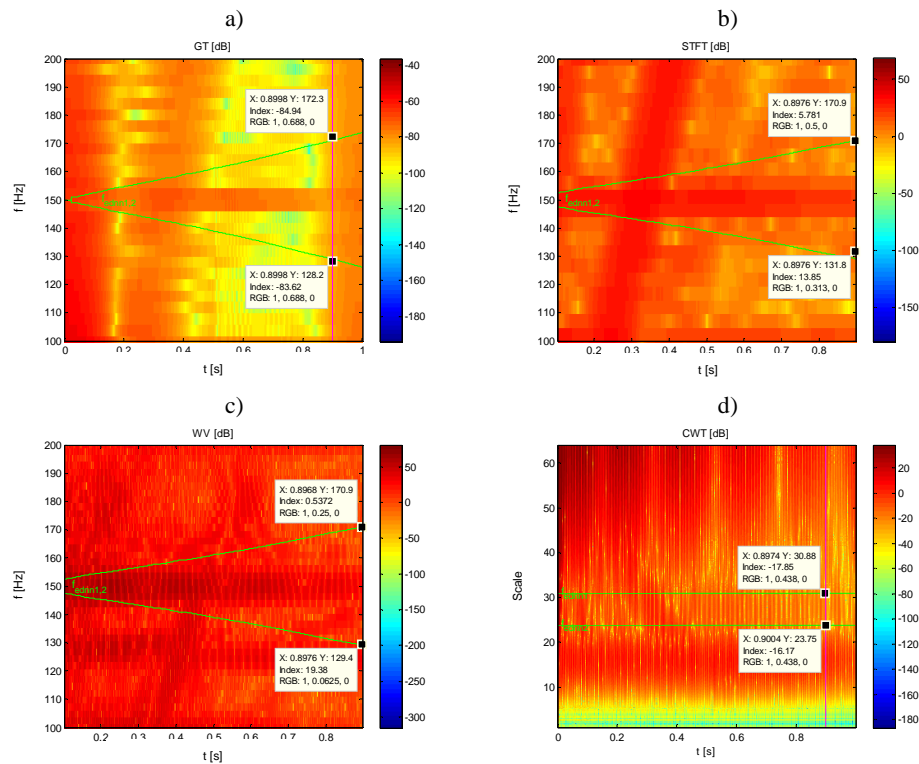


Fig. 20. Sygnał aproksymacji: a3 – dla ED: i\_de: a) GT, b) STFT, c) WV, d) CWT [P6]

### Metody wczesnej detekcji wystąpienia zwarcia w uzwojeniach stojana silników indukcyjnych, opartej o wykorzystanie filtrów falkowych i wielomianów ortogonalnych Legendre'a

W artykule [P10] przedstawiono wyniki analiz sygnałów zarejestrowanych w różnych stanach zwarcia międzyzwojowych w uzwojeniu stojana silnika indukcyjnego, pracującego przy stałym obciążeniu. Analizy przeprowadzono w domenie czasowo-częstotliwościowej wykorzystując proste ortonormalne bazy falkowe.

Jako sygnały diagnostyczne, których analiza pozwoli na sformułowanie diagnozy co do przyczyn asymetrii zasilania, przetestowano m.in. sygnały proporcjonalne do strumienia poosiowego, napięcia zerowego, prądu zwarciovowego, przyspieszenia drgań, ciśnienia akustycznego, momentu elektromagnetycznego oraz prądów i napięć fazowych.

Jednym z głównych wskaźników diagnostyki sygnałowej jest określenie udziału energii wybranego elementu rozkładu wielorozdzielczego w całkowitej energii sygnału diagnostycznego. Ważną informacją jest też bezwzględna wartość energii, niesiona przez wszystkie detale rozkładu, liczona dla różnych wykorzystywanych w analizach sygnałów diagnostycznych (Tabela 5).

Tabela 5. Wartości bezwzględne energii części szczegółowej rozwinięcia falkowego dla wykorzystywanych w tej pracy sygnałów diagnostycznych

Energia detali sygnału z pomiaru		Przyjęta liczba poziomów częstotliwości pełnego rozkładu $N$			
sygnał	jednostka	12 - sym	12 – zw. 1-2	12 – zw. 1-3	uwagi
prąd fazy L1	[A <sup>2</sup> *s]	1048,55	1052,45	1063,25	wzrost
prąd fazy L2	[A <sup>2</sup> *s]	1064,31	1032,75	1090,54	
prąd fazy L3	[A <sup>2</sup> *s]	1078,90	1106,64	1092,75	wzrost
napięcie fazy L1 [V <sup>2</sup> *s]		7 473 232	7 522 642	7 323 538	
napięcie fazy L2 [V <sup>2</sup> *s]		7 400 333	7 385 624	7 264 234	obniżanie
napięcie fazy L3 [V <sup>2</sup> *s]		7 514 143	5 554 712	7 366 448	
moment elektromagnes. [N <sup>2</sup> m <sup>2</sup> *s]		56,6945	93,5757	33,2604	
sygnał ~ prędkość obrotowa [V <sup>2</sup> *s]		814,357	810,495	796,257	
sygnał~strumień poosiowy [Wb <sup>2</sup> *s]		28,7314	31,3312	38,1515	wzrost
prąd zwarcia zwojowego [A]		0,0111	0,0831	0,2332	wzrost
przyspieszenie drgań – oś X [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]		0,0395	0,0326	0,0403	
przyspieszenie drgań – oś Y [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]		0,0540	0,0363	0,0465	
ciśnienie akustyczne [Pa <sup>2</sup> *s]		0,0141	0,0067	0,0101	
napięcie zerowe [V <sup>2</sup> *s]		18,6411	18,2989	17,662	obniżanie

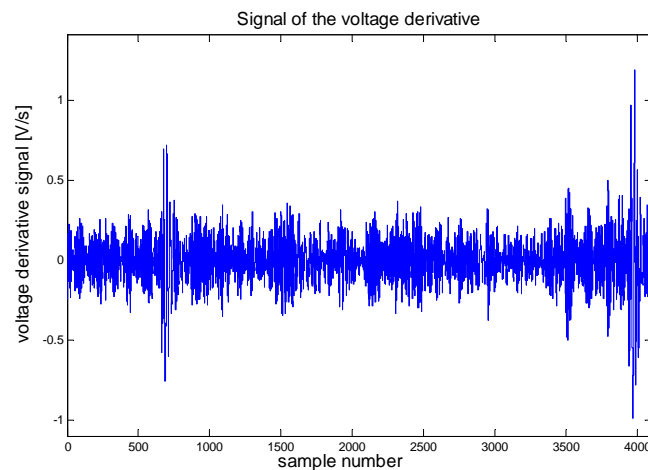
Celem przeprowadzonych badań było przyszłe wykorzystania ich wyników do budowy działającego w czasie rzeczywistym systemu diagnostycznego.

W artykule [P14] przedstawiono wyniki badań charakteru przepływów energii sygnału strumienia poosiowego maszyny indukcyjnej pomiędzy sąsiadującymi ze sobą pasmami częstotliwości w stanie ustalonym, w zależności od obciążenia maszyny. Istniejące okresowe przepływy energii tego sygnału diagnostycznego w istotny sposób utrudniają przeprowadzenie detekcji i identyfikacji uszkodzeń.

Oddzielenie tych efektów wymaga zastosowania zaawansowanych metod analizy w domenie czasowo-częstotliwościowej. W artykule zaprezentowano zastosowanie wąskopasmowych filtrów falkowych, wykorzystujących rodzinę ortogonalnych wielomianów Legendre'a. Wyniki analiz potwierdziły, że zapewnienie wystarczającej selektywności układu diagnostycznego jest możliwe.

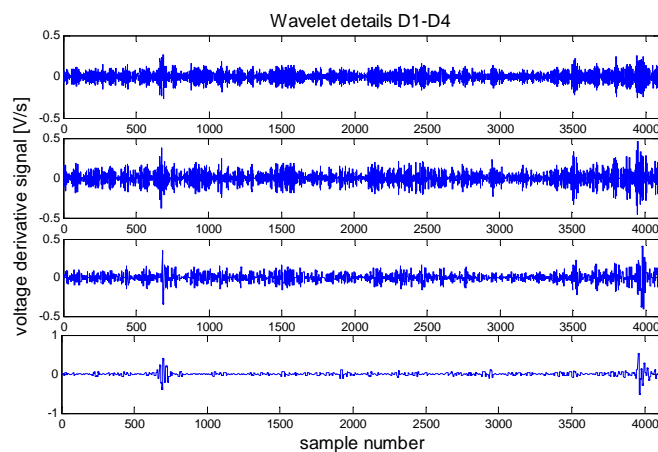
## Diagnozowanie poziomu emisji wyładowań niezupełnych w wysokonapięciowych generatorach synchronicznych dużej mocy, w oparciu o sygnał z cewek Rogowskiego, i przy wykorzystaniu filtrów falkowych i wielomianów ortogonalnych

W artykule [P16] zaprezentowano zastosowanie detekcyjnych wąskopasmowych filtrów falkowych do analizy intensywności wyładowań niezupełnych w izolacji uzwojeń generatora. Sygnałem diagnostycznym, charakteryzującym przebieg ich emisji jest sygnał napięciowy proporcjonalny do pochodnej prądów rejestrowana rejestrowany na wyjściu układu z cewkami Rogowskiego. Przykładowy przebieg przedstawiono na Rys. 21.

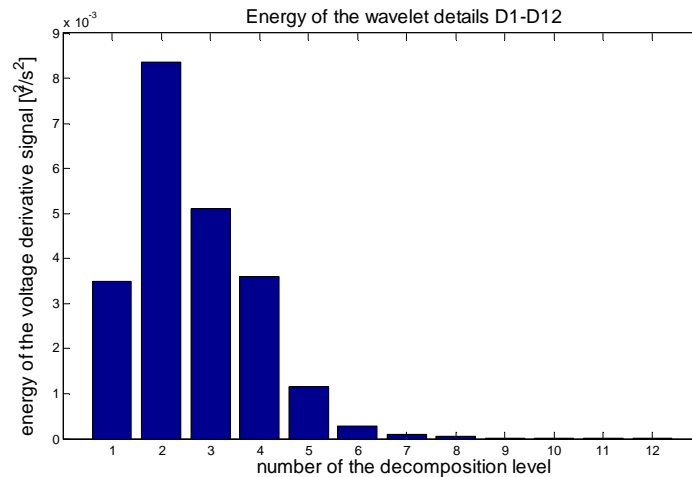


Rys. 21. Sygnał proporcjonalny do pochodnej napięcia z cewki Rogowskiego po filtracji filtrem górnoprzepustowym dla pierwszej fazy generatora TG 5 – próbki z zakresu 1 – 4096 okresu [P16]

Skonstruowanie unikalnych ortonormalnych filtrów detekcyjnych pozwoliło na uzyskanie wystarczającej selektywności detekcji w porównaniu do selektywności uzyskanej przy zastosowaniu standardowych narzędzi analitycznych. Na Rys. 22 przedstawiono przebiegi detali falkowych sygnału a na rys.23 energię detali.



Rys.22. Przebiegi detali falkowych sygnału pierwszej fazy generatora TG5 na poziomach 1 – 4, niosące informację o wyładowaniach niezupełnych dla zakresu 1-4096 próbek okresu.



Rys. 23. Energia detali falkowych sygnału pierwszej fazy generatora TG5 na poziomach 1 – 12, dla zakresu 1-4096 próbek okresu

Stwierdzono, że wybrany wielomian odwzorowuje charakterystyczne własności sygnału napięciowego proporcjonalnego do pochodnej prądu. W oparciu o tak skonstruowane bazy falkowe przeprowadzono analizy numeryczne, a wyniki tych analiz przedstawiono w postaci rozkładów energetycznych detali.

Wykazano, że analiza emisji wyładowań niezupełnych podczas eksploatacji maszyn dostarcza cennych informacji o jakości technologii ich wykonania, a także o aktualnym stanie układów izolacyjnych jej uzwojeń. Wybór metody analizy był podyktowany niestacjonarnym charakterem procesów fizycznych towarzyszących wyładowaniom niezupełnym.

### ***O3. Elementy i układy wspomagające diagnostykę maszyn elektrycznych***

#### **Pomiar prądu w prętach klatki prototypowego wirnika silnika indukcyjnego**

W artykule [P4] przedstawiono koncepcję i sposób realizacji pomiarów prądów w prętach prototypowego wirnika silnika indukcyjnego. Do pomiarów wykorzystano cewki Rogowskiego. Cewki pomiarowe zabudowane na każdym z 30 prętów klatki wirnika na etapie produkcji wirnika. Sygnały proporcjonalne do pochodnej prądów w prętach klatki wirnika wyprowadzono na zewnątrz maszyny na specjalne pierścienie ślizgowe. Następnie sygnały z zespołu szczotek przylegających do pierścieni ślizgowych podano na wzmacniacze całkujące i rejestrowano przy pomocy karty pomiarowej i dedykowanego oprogramowania. Badania przeprowadzono podczas normalnej pracy maszyny przy różnym obciążeniu. Zarejestrowane przebiegi prądów w prętach klatki wirnika dla różnych przypadków uszkodzenia klatki poddano obróbce i analizie. Przeanalizowano numerycznie poprawność pomiarów prądów w prętach klatki przy pomocy cewek Rogowskiego. Podano możliwość wykorzystania wyników pomiarów do doskonalenia algorytmów diagnostycznych dla wykrywania uszkodzeń klatek wirników silników indukcyjnych.

#### **Użycie smartfonów i zabudowanych w nich czujników do diagnostyki stanu maszyn elektrycznych**

Według statystyk łożyska są najczęściej uszkodzonymi elementami silników niskonapięciowych. Jednocześnie problematyka diagnostyki łożysk tocznych opiera się o ugruntowaną wiedzę w zakresie monitorowania stanu maszyn wirujących. W wielu przypadkach jednakże, instalacja systemu monitorowania stanu łożysk wymagającego użycia wysokiej klasy akcelerometrów wiąże się z wysokimi kosztami, których poniesienie jest ekonomicznie nieuzasadnione. Zaproponowany test sprawdza możliwości monitorowania stanu łożysk tocznych w oparciu o sygnały akustyczne

rejestrowane przez standardowy, łatwo dostępny telefon komórkowy. Główną trudnością w korzystaniu z mikrofonu wbudowanego w telefon komórkowy do celów diagnostyki maszyn wirujących jest fakt, że charakterystyka częstotliwościowa mikrofonu telefonu komórkowego jest ograniczona poniżej 200 Hz. Wyniki przedstawione w artykule [P15] jednakże wskazują, że przy odpowiednim podejściu do przetwarzania sygnału możliwe jest wykrycie obecności uszkodzeń w łożyskach.

### **Diagnozowanie silników w układach napędowych wagonów tramwajowych podczas normalnej jazdy tych pojazdów i zaproponowanie wskaźników do oceny stanu klatki i układu izolacyjnego silnika dla napędów z silnikami indukcyjnymi zasilanymi z falowników**

W artykule [P17] przedstawiono doświadczenia autorów z przeprowadzonych badań diagnostycznych silników indukcyjnych klatkowych napędów wagonów tramwajowych. Badania diagnostyczne przeprowadzono na kilkudziesięciu silnikach pracujących w kilku wagonach tramwajowych w jednym z przedsiębiorstw komunikacyjnych. Pomiarów diagnostycznych z wykorzystaniem cewek Rogowskiego, karty pomiarowej i dedykowanego oprogramowania wykonano w dwóch różnych porach roku. Zebrane dane pomiarowe poddano szczegółowej analizie i dokonano oceny stanu poszczególnych badanych silników. Analizy zarejestrowanych sygnałów podczas jazd testowych pozwoliły na ocenę stanu silników na podstawie pozyskanych informacji ze stanu ustalonego, jaki i stanów dynamicznych pracy tych maszyn. Wybrano najskuteczniejsze metody analizy i opracowano algorytmy oceny diagnostycznej. W oparciu o przeprowadzone analizy sformułowano procedurę badań diagnostycznych, która pozwala na wiarygodną ocenę stanu silników podczas jazd kontrolnych. Wypracowana metoda będzie przydatna w przedsiębiorstwie do typowania maszyn do remontu jak i kontroli stanu maszyn po wykonanych zabiegach remontowych. Opracowane procedury badań mogą zostać również zaadaptowane do oceny stanu silników indukcyjnych klatkowych w napędach innych pojazdów niż wagony tramwajowe.

### **Układ z tanimi przetwornikami z rdzeniem ferromagnetycznym do pomiaru napięcia odkształconego, dedykowanego m.in. do pomiaru napięć na wyjściu falownika napięcia zasilającego silnik indukcyjny**

Artykuł [P18] przedstawia propozycję projektu taniego przetwornika z czujnikiem Halla umieszczonym w szczelinie powietrznej rdzenia ferromagnetycznego. Zastosowanie takiego czujnika umożliwia wykonanie pomiarów wartości chwilowych odkształconego napięcia występującego na zasilaniu obwodów maszyn elektrycznych. Przygotowany w ramach badań przetwornik pozwala na galwaniczne oddzielenie mierzonego napięcia od napięcia na wyjściu przetwornika. Przeprowadzono próby i testy w celu określenia wpływu częstotliwości, dodatkowej rezystancji i reaktancji obwodu uzwojenia na przesunięcie fazowe napięcia. Indukcyjności rozproszonych uzwojenia pomiarowego nawiniętego na rdzeniu ferrytowym ze szczeliną powietrzną obliczano z użyciem metody elementów skończonych. Przeprowadzono eksperymentalne badania kąta przesunięcia fazowego napięcia i spadku amplitudy napięcia wyjściowego dla opracowanych przetworników napięcia z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego pod kątem przyszłych aplikacji w układach diagnostycznych.

*Podsumowując omówienie osiągniętych wyników w wybranym reprezentatywnym cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe pragnę podkreślić, że wszystkie opracowane i zweryfikowane metody diagnostyczne z powodzeniem mogą być stosowane w specjalistycznych systemach diagnostycznych i procedurach badań maszyn np. podczas remontu, uruchomienia maszyny do pracy czy normalnej eksploatacji maszyn w układzie napędowym. Zbiór opracowanych metod, algorytmów i narzędzi wspomagających diagnostykę stanowi spójną całość dla obiektywnej oceny stanu maszyn prądu przemiennego.*

#### **4.3.4. Podsumowanie i określenie wkładu autora w rozwój dyscypliny**

Za moje główne osiągnięcie naukowe uważam opracowanie i weryfikację skutecznych metod i algorytmów diagnostycznych dla oceny stanu technicznego maszyn prądu przemiennego. Wyniki przeprowadzonych badań i analiz zostały zawarte w przedstawionym cyklu 18 publikacji. Obiektami badań były silniki indukcyjne klatkowe, silniki oraz generatory synchroniczne. Dla nich opracowałem metody diagnostyki i zastosowałem opracowane autorsko elementy i układy ją wspomagające. Wyróżniłem przy tym trzy główne kierunki badań, których wyniki składają się na jedno całościowo spójne osiągnięcie. Przyjęty przeze mnie podział jest arbitralny i zarazem umowny, bowiem tematyka części artykułów dotyczy więcej niż jednego głównego kierunku badań. Poniżej dla każdego z tak rozdzielonych kierunków badań przedstawiam osobisty wkład, wniesiony w rozwój dyscypliny.

Znaczna część publikacji wchodzących w skład osiągnięcia dotyczy opracowania i stosowania metod czasowo-częstotliwościowej analizy sygnałów na potrzebę znalezienia charakterystycznych symptomów pojawiających się uszkodzeń już we wczesnej ich fazie rozwoju. Metody te pozwalają na analizę i wykorzystanie stanów przejściowych i dynamicznych do dokładniejszego i rzetelniejszego rozpoznania stanu maszyny. Często mogą też być cennym uzupełnieniem stosowanych już metod diagnostycznych dla stanu ustalonego pracy. Umiejętne stosowanie analiz w stanach przejściowych i dynamicznej pracy maszyn umożliwia, moim zdaniem, wydobywanie z zarejestrowanych sygnałów diagnostycznych większej liczby informacji. Pozwala to na dokładniejsze określenie stanu technicznego maszyny oraz umożliwia znalezienie i ocenę ilościową występującego uszkodzenia. Jednym z najważniejszych argumentów przemawiającymi za tymi metodami jest fakt, że do wydobywania jednoznacznych symptomów uszkodzenia maszyny nie jest wymagane jej obciążenie. Stosowanie tych metod wydaje się mieć przyszłość w układach pojazdów z napędem elektrycznym. Szczególnie dotyczy to pojazdów, w których napędzanych silnikami indukcyjnymi klatkowymi lub synchronicznymi.

Przeprowadzone przeze mnie w ramach przedkładanego osiągnięcia naukowego badania wymagały wykonania wielu obliczeń, pomiarów oraz analiz pozyskanych danych symulacyjnych i eksperymentalnych. Przyjęty przez mnie arbitralny podział na kierunki badań jest podziałem umownym. W zdecydowanej większości prac występowała potrzeba równoczesnego użycia metod analiz dla stanu ustalonego i dla stanów dynamicznych oraz nowych innowacyjnych narzędzi i urządzeń wspomagających proces diagnozowania maszyn elektrycznych. Zaproponowane metody i uzyskane wyniki są zgodne z aktualnymi trendami w krajowych i światowych kierunkach badań w zakresie diagnostyki maszyn elektrycznych. Większość zaproponowanych przeze mnie metod i algorytmów diagnostycznych dla maszyn prądu przemiennego posiada aspekt praktyczny i została zweryfikowana eksperymentalnie w przemyśle zarówno na obiektach o małej jak i dużej mocy.

**Najważniejszymi moimi osiągnięciami zawartymi w cyklu publikacji stanowiącymi osiągnięcie naukowe oraz wpisującymi się w rozwój dyscypliny są:**

##### ***01. Nowe algorytmy w systemach diagnostycznych silników synchronicznych oraz silników indukcyjnych o różnych cechach konstrukcyjnych***

- opracowanie systemu diagnostycznego z układem wnioskowania opartym na sieciach neuronowo-rozmytych i zweryfikowanie działania tego systemu na dużych silnikach pracujących w jednej z polskich elektrowni [P1],
- opracowanie metody wczesnego wykrywania uszkodzeń silników indukcyjnych z gałęziami równoległymi w stojanie [P9],
- opracowanie metody diagnostycznej umożliwiającej rozróżnianie uszkodzenia danej klatki w silniku indukcyjnym dwuklatkowym [P13],



- opracowanie i zweryfikowanie metod diagnostycznych umożliwiających wykrywanie uszkodzeń silników indukcyjnych w oparciu o strumień poosiowy [P11],
- porównanie i ocena wyników analiz bispektralnych dla nieanalizowanych do tej pory równocześnie rejestrowanych sygnałów prądu stojana, napięcia proporcjonalnego do strumienia poosiowego, sygnału drganiowego oraz ciśnienia akustycznego, dla różnie uszkodzonych silników indukcyjnych [P8],
- porównanie i ocena zastosowania prądu wzbudzenia [P5], prądu w gałęziach równoległych, prądów fazowych, prądów cyrkulacyjnych i napięcia wałowego jako użytecznego sygnału do wypracowania wskaźnika oceny stanu technicznego silników synchronicznych [P12],

***O2. Transformacje czasowo-częstotliwościowe, filtry falkowe i wielomiany ortogonalne w zastosowaniu do detekcji uszkodzeń we wczesnej fazie ich powstawania, na przykładzie silników indukcyjnych małej mocy i generatorów synchronicznych dużej mocy***

- opracowanie skutecznych metod diagnostyki dla silników indukcyjnych podczas rozruchu oraz pracy przy zmiennym obciążeniu, z wykorzystaniem transformacji czasowo-częstotliwościowych [P2], [P3], [P6], [P7],
- opracowanie metody wczesnej detekcji wystąpienia zwarć w uzwojeniach stojana silników indukcyjnych, opartej o wykorzystanie filtrów falkowych i wielomianów ortogonalnych Legendre'a [P10], [P14],
- opracowanie metody diagnozowania poziomu emisji wyładowań niezupełnych w wysokonapięciowych generatorach synchronicznych dużej mocy, w oparciu o sygnał z cewek Rogowskiego i przy wykorzystaniu filtrów falkowych i wielomianów ortogonalnych [P16],

***O3. Elementy i układy wspomagające diagnostykę maszyn elektrycznych***

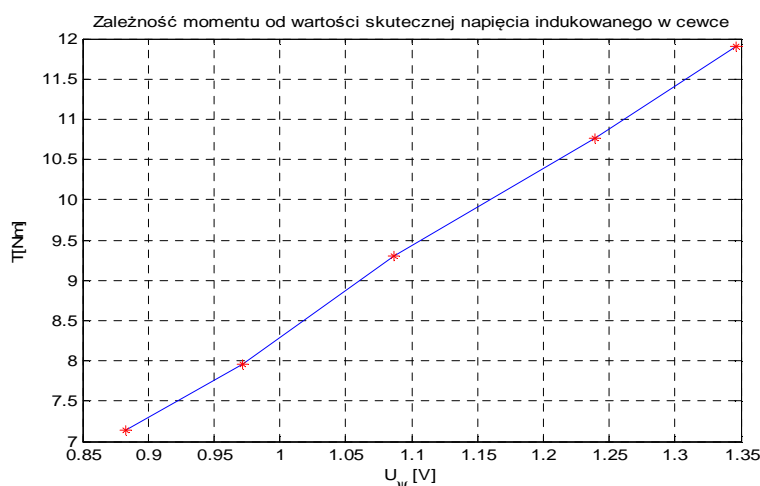
- opracowanie metody pomiaru prądu w prętach klatki prototypowego wirnika silnika indukcyjnego i wykonanie analiz, mających na celu zobrazowanie rozptywu prądów w prętach klatki wirnika przy wystąpieniu asymetrii klatki [P4],
- weryfikacja i ocena przydatności pomiarów wykonanych przy użyciu smartfonów i zabudowanych w nich czujników do diagnostyki stanu maszyn elektrycznych [P15],
- opracowanie metody diagnozowania silników w układach napędowych wagonów tramwajowych podczas normalnej jazdy tych pojazdów i zaproponowanie wskaźników do oceny stanu klatki i układu izolacyjnego silnika dla napędów z silnikami indukcyjnymi zasilanymi z falowników [P17],
- opracowanie układu z tanimi przetwornikami z rdzeniem ferromagnetycznym do pomiaru napięcia odkształconego, dedykowanego m.in. do pomiaru napięć na wyjściu falownika napięcia zasilającego silnik indukcyjny [P18].

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych wnioskodawcy, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta

Moim głównym tematem badawczym były i są zagadnienia związane z opracowaniem i weryfikacją skutecznych metod i algorytmów diagnostycznych dla oceny stanu technicznego maszyn prądu przemiennego. Oprócz wiodącej tematyki w mojej pracy badawczej po doktoracie zajmowałem się jeszcze następującymi zagadnieniami:

- zastosowaniem strumienia unipolarnego do wyznaczania momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej oraz użyciem tego sygnału w zabezpieczeniach silników elektrycznych od skutków zwarć (w latach 2014-2019),
  - odzyskiem nadwyżek energii z sieci ciepłowniczej (2015 r.),
  - skutecznością działania wyłączników w instalacjach z rezerwowymi źródłami zasilania (w latach 2016-2017),
  - niskoczęstotliwościowymi metodami próbkowania sygnałów (2016 r.),
  - projektowaniem niezawodności systemów krytycznych dla pojazdów szynowych (w latach 2016-2017),
  - projektowaniem układów sterowania do stanowiska na potrzebę testów zderzeniowych (w latach 2017-2018),
  - optymalizacją zużycia energii przez sprężarki w procesie produkcyjnym (w latach 2013-2015),
  - prognozowaniem temperatury wody chłodzącej dla instalacji petrochemicznych (w latach 2005-2009).
- **Zastosowanie strumienia unipolarnego do wyznaczania parametrów maszyny i zabezpieczenia silnika od skutków zwarć**

Wyniki badań nad wykorzystaniem strumienia poosiowego do diagnostyki maszyn indukcyjnych zachęciły mnie i współautorów do podjęcia próby oszacowania momentu obciążenia silnika w stanie ustalonym poprzez wykorzystanie sygnału strumienia. Przykładową zależność momentu w funkcji przetworzonego sygnału strumienia poosiowego przedstawiono na Rys.8.



Rys. 8. Przykładowa zależność momentu elektromagnetycznego w funkcji skutecznej wartości przetworzonego sygnału napięciowego indukowanego przez strumień poosiowy na wyjściu cewki

Bezpośrednie wyznaczenie momentu ze strumienia dla konkretnej maszyny wymaga uzyskania charakterystyki „strumień – moment” dla możliwie wielu punktów pracy. Zadanie to jest wykonalne na stacji prób lub na stanowisku pracy maszyny i ma sens w przypadkach, kiedy zachodzi potrzeba wyznaczania na bieżąco wartości samego momentu obciążenia, sprawności maszyny lub efektywności energetycznej procesu. Również z sygnału napięciowego proporcjonalnego do strumienia poosiowego można wyznaczyć prędkość obrotową lub kątową maszyny elektrycznej prądu przemiennego. Sygnał indukowany w cewce pomiarowej proporcjonalny do strumienia poosiowego bardzo mocno reaguje na

wystąpienie zwarcia w uzwojeniach stojana. Fakt ten można również wykorzystać w budowie układu zabezpieczenia silnika od skutków zwarć. Aspekty wykorzystania strumienia poosiowego zastrzeżono w trzech zgłoszeniach wynalazku. Eksperymentalne próby wyznaczania momentu obciążenia z sygnału proporcjonalnego do strumienia poosiowego opublikowano również w dwóch artykułach. Wykaz prac związanych z tą tematyką:

1. Ławrowski Z., Duda A., Petryna J., **Sułowicz M.**, 2016, *Wyznaczanie momentu obciążenia silnika indukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego*. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, 2016, Nr 2 (110), s. 1–8.
2. Petryna J., Tulicki J., **Sułowicz M.**, *Calculating an electromechanical torque of a squirrel cage motor based on an axial flux obtained by the FEM*. ITM Web of Conferences. 2017, Vol.15, 8s. Exploitation and Machine Building. Mat. konf. II International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CMES'17), Lublin, Poland, 23-25.11.2017. doi:10.1051/itmconf/20171505004. ISSN 2271-2097.
3. **Sułowicz M.**, Petryna J., Duda A., Tulicki J., Ludwinek K., 2019, *Zestaw do pomiaru momentów oraz prędkości maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, 2019, Zgłoszenie wynalazku A1 429484 (P.429484) Urząd Patentowy RP, 2019.
4. **Sułowicz M.**, Petryna J., Ludwinek K., 2019, *Zestaw do wykrywania zwarć i odłączania od zasilania maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, 2019, Zgłoszenie wynalazku A1 429485 (P.429485), Urząd Patentowy RP, 2019.
5. **Sułowicz M.**, Petryna J., Duda A., Tulicki J., Ludwinek K., 2019, *Silnik prądu przemiennego*, 2019, Zgłoszenie wynalazku A1 429483 (P. 429483), Urząd Patentowy RP, 2019.

- **Odzysk nadwyżek energii z sieci ciepłowniczej**

W ramach badań prowadzonych w Katedrze Diagnostyki Maszyn Elektrycznych uczestniczyłem w pilotażowych pracach związanych z odzyskiem nadwyżek energii z sieci ciepłowniczej miasta Krakowa. Jednym ze sposobów redukcji ciśnienia w sieci ciepłowniczej jest zastosowanie układu turbiny i generatora, który w połączeniu z układem energoelektronicznym może zamienić nadwyżkę energii traconej w klasycznym układzie redukcji ciśnienia na energię elektryczną przy właściwym sterowaniu układem turbina-generator. W zakresie przeprowadzonych prac badawczych wykonałem pomiary związane z określeniem sprawności generacji oraz oddziaływania turbiny na sieć ciepłowniczą (drgania) oraz otoczenie (hałas). Wyniki tych prac zostały zawarte w artykule:

1. Borkowski D., **Sułowicz M.**, Węgiel T., Liszka D., 2015, *Electrical energy recovery from network water pressure*, 2015 Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), Kielce 17–19.09.2015, pp. 63-68. doi:10.1109/WZEE.2015.7394016.

- **Badania skuteczności działania wyłączników nadprądowych w instalacjach z rezerwowymi źródłami zasilania**

Badania dotyczyły oceny skuteczności zadziałania wyłączników nadprądowych jako środka ochrony przeciwporażeniowej w obwodach z generatorem synchronicznym (samowzbudnym) pracującym jako rezerwowe zasilanie. Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym dla instalacji zasilonej z generatora synchronicznego o mocy 5,5 kVA i napięciu 3x230 V. Wykonane pomiary dla przypadku zwarcia wykazały, że dla generatorów synchronicznych samowzbudnych (dotyczy to większości agregatów prądotwórczych z prądem stojana mniejszym niż 32 A). Jak wykazały badania zabezpieczenie nadprądowe w takich instalacjach dobrane na prądy znamionowe (tzn. aby możliwe było pełne wykorzystanie mocy generatora) nie może pracować jako zabezpieczenie przed zwarciami i jednocześnie jako środek ochrony przeciwporażeniowej, ponieważ nie wyłączają tej instalacji w czasie poniżej 0,4 s (warunek skuteczności zadziałania zabezpieczenia jako środka ochrony przeciwporażeniowej dla napięcia 230 V). W pracy [1] zaproponowano układ, w którym wyłączniki nadprądowe umożliwiają pełne wykorzystanie mocy generatora i jednocześnie są użyte jako środek ochrony przeciwporażeniowej (aby zadziałanie zabezpieczenia zawsze wystąpiło w czasie

poniżej 0,4 s) w obwodach z generatorem synchronicznym (samowzbudnym) pracującym jako rezerwowe zasilanie. Wyniki omówionych badań przedstawione są w pracy:

1. Ludwinek K., Szczepanik J., **Sułowicz M.**, 2017, *Experimental Analysis of Assessing of the Tripping Effectiveness of Miniature Circuit Breakers in an Electrical Installation Fed from a Synchronous Generator Set*. Electric Power Systems Research, Vol. 142, 2017, pp. 341–350.

- **Niskoczęstotliwościowe metody próbkowania sygnałów**

Jednym z zadań badawczych, które realizowałem była weryfikacja niskoczęstotliwościowych metod próbkowania i zastosowanie tych metod do monitorowania parametrów pracy silnika indukcyjnego. Przeanalizowałem podstawy teoretyczne nowego sposobu pomiaru chwilowych wartości prądu i napięcia z częstotliwością próbkowania zaledwie 8 Hz. Formuły obliczeniowe zastosowanej metody przetwarzania są stosunkowo proste, co pozwala na ich aplikację w prostych układach mikroprocesorowych. Testowałem tę metodę pomiarową na układzie zbudowanym na mikrokontrolerze ATmega 128. Porównałem uzyskane wyniki pomiarów z wynikami pozyskanymi z użyciem karty pomiarowej, gdzie sygnał próbkowano z częstotliwością 10 kHz. Wyniki tych prac badawczych zostały opublikowane w dwóch artykułach:

1. Jaraczewski M., Mielnik R., **Sułowicz M.**, 2016, *Aplikacja niskoczęstotliwościowej metody pomiaru i przetwarzania sygnałów na potrzebę monitorowania silników indukcyjnych klatkowych*. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, 2016, Nr 2 (110), s. 9–14.
2. Jaraczewski M., Mielnik R., **Sułowicz M.**, 2016, *The low-frequency measuring method and signal processing application in electrical machines and electric devices monitoring*. 2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), 04–08.05.2016, Rzeszów. 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/WZEE.2016.7800242.

- **Projektowanie niezawodności systemów krytycznych dla pojazdów szynowych**

Zajmowałem się również zagadnieniami związanymi z bezpieczeństwem procesu transportu kolejowego. Współuczestniczyłem w pracach związanych z projektowaniem systemu monitorowania i kontroli niezajętości linii kolejowej dla automatycznych urządzeń sygnalizacji kolejowej SRK.

Najważniejszym zadaniem tej klasy systemu jest zapewnienie bezpieczeństwa ruchu kolejowego i drogowego. Rozwiązanie to należy do klasy systemów krytycznych i jest szczególnie ważne nie tylko ze względów bezpieczeństwa, aby zapobiec kolizji pojazdów kolejowych i kołowych, ale także pociąga za sobą aspekty ekonomiczne. Synteza bezpiecznego systemu pomiarowo-kontrolnego została oparta na modelu dynamicznym wykorzystującym sieć Petriego. Oceniono czynniki niezawodności i omówiono zalety proponowanych rozwiązań systemowych. Wyniki prac badawczych zamieszczono w publikacji:

1. Mielnik R, **Sułowicz M.**, Ludwinek K., Jaśkiewicz M., 2018, *The reliability of critical systems in railway transport based on the track rail circuit*. Analysis and simulation of electrical and computer systems. eds. Damian Mazur, Marek Gołębiowski, Mariusz Korkosz. Cham, Springer, 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, 452, pp. 377–393, ISSN 1876–1100; doi: 10.1007/978–3–319–63949–9\_25.

- **Projektowanie układów sterowania do stanowiska na potrzebę testów zderzeniowych**

W latach 2017-2018 uczestniczyłem w projektowaniu stanowiska testowego ze specjalnym systemem sterowania i akwizycją danych na potrzebę eksperymentalnej analizy wielkości fizycznych podczas testu zderzeniowego pojazdu. Moim zadaniem było opracowanie układu do akwizycji sygnałów pomiarowych zbieranych podczas badań eksperymentalnych. Realizację zadania zabezpieczała zainstalowana na tym stanowisku aparatura pomiarowa, umożliwiająca rejestrację i określenie przemieszczeń części ciała manekina, wartości sił w pasach bezpieczeństwa oraz wartości opóźnienia na poszczególnych częściach atrapy ciała. Wyniki badań zamieszczono w pracy:

1. Ludwinek K., Jurecki R., Jaskiewicz M., Szumska E., **Sułowicz M.**, 2018, *A test stand for the experimental analysis of R. physical quantities during crash test at low speeds*. 2018 XI

International Science–Technical Conference Automotive Safety. IEEE, 2018, pp. 1-7. 18–20.04.2018, Casta, Slovakia, doi: 10.1109/AUTOSAFE.2018.8373306.

- **Optymalizacja zużycia energii przez sprężarki w procesie produkcyjnym**

Pod moim nadzorem zostały przeprowadzone pomiary zużycia energii pobieranej przez silnik indukcyjny napędzający sprężarkę śrubową. Badania układów elektromechanicznych pod kątem zużycia, a dalej optymalizacji zużycia energii wykazały możliwość obniżenia kosztów eksploatacji i tym samym oszczędności spowodowanych zmniejszeniem kosztów energii. Wyniki prac badawczych opisano w dwóch artykułach:

1. Rzepisko D., **Sułowicz M.**, 2015, *Optymalizacja cyklu pracy napędu sprężarek śrubowych*. Napędy i Sterowanie, Wydawnictwo "Druk–Art" S.C., Racibórz, 2015, R. 17, Nr 2 (190), s. 54–60, ISSN 1507–7764.
2. Rzepisko D., **Sułowicz M.**, 2014, *Optymalizacja cyklu pracy i zużycia energii przez silniki sprężarek śrubowych*. Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, BOBRME Katowice, 2014, Nr 104, s. 287–292, ISSN 0239–3646.

- **Prognozowanie temperatury wody chłodzącej dla instalacji petrochemicznych**

W zakresie tego tematu badawczego rozwiązałem problem prognozowania temperatury w wybranych punktach pierścieniowej sieci wody chłodzącej, wykorzystywanej do obniżania temperatury produktów naftowych wytwarzanych w kilkunastu różnych instalacjach produkcyjnych w przedsiębiorstwie PKN Orlen w Płocku. Dla służb utrzymania ruchu instalacji petrochemicznych oraz sieci wody obiegowej jest to bardzo ważne rozwiązanie, gdyż pozwala ustalić optymalne warunki pracy instalacji oraz ilości pomp tłoczących wodę do sieci wody obiegowej. Prognozowanie temperatury zrealizowałem z wykorzystaniem sieci neuronowych SVM, które były uczone na danych archiwalnych zarejestrowanych w systemie monitorowania parametrów procesu oraz na podstawie zmiennych pogodowych, mających decydujący wpływ na przebieg procesu schładzania wody. Wyniki tych prac badawczych zostały opublikowane w dwóch artykułach:

1. Malinowski P., **Sułowicz M.**, 2010, *Zastosowanie sieci neuronowych typu SVM do zagadnienia prognozowania temperatury wody chłodzącej w rafinerii ropy naftowej PKN Orlen*. Przemysł Chemiczny, 89/9 (2010), s. 1236–1240.
2. Malinowski P., **Sułowicz M.**, Bujak J., 2011, *Neural model for forecasting temperature in a distribution network of cooling water supplied to systems producing petroleum products*. International Journal of Refrigeration, Volume 34, Issue 4, June 2011, pp. 968–979.

Podsumowując pragnę nadmienić, że uczestniczę w pracach badawczych w ramach współpracy pomiędzy Politechniką Krakowską i Politechniką Świętokrzyską, której efektem będą kolejne zgłoszenia wynalazków (jeszcze w roku bieżącym 2019) dotyczące opracowania lekkiej konstrukcji silnika elektrycznego do napędu obiektów latających.

## 6. Tabelaryczne zestawienie dorobku i wskaźników bibliometrycznych

**Baza Web of Science** (na dzień 25.04.2019 r.):

- Liczba publikacji: **28**,
- H-Index: **6**,
- liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań): **99 (83)**,
- sumaryczny Impact Factor: **10.891**

**Baza Scopus** (na dzień 25.04.2019 r.):

- liczba publikacji: **33**,
- H-Index: **6**,
- liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań): **114 (94)**,

Publikacje	Przed doktoratem			Wszystkie		
	Liczba publikacji	Punkty MNiSW	IF (WoS)	Liczba publikacji	Punkty MNiSW	IF (WoS)
Autorstwo						
Główny autor	5	-*	-	18	107	2.717 (4)
Współautor	20	-*	-	115	744	8.174 (24)
Suma	<b>25</b>	-*	-	<b>133</b>	<b>851</b>	<b>10.891 (28)</b>

\* - niejednoznaczna punktacja w latach 1998 – 2005, Oddział Informacji Naukowej Politechniki Krakowskiej nie przypisał punktów za ten okres w bazie Bibliografii Publikacji Pracowników PK

Typ publikacji	Liczba publikacji przed doktoratem	Liczba wszystkich publikacji
Monografie i rozdziały w monografiach	0	3
Artykuły w czasopiśmie JCR	0	9
Artykuły w czasopiśmie	2	67
Materiały konferencyjne	23	54
Suma	<b>25</b>	<b>133</b>

*S. Winiarski*

.....  
Podpis wnioskodawcy