

Wrocław, 25.04.2019 r.

Dr inż. Marcin Wolkiewicz
Politechnika Wroclawska
Wydział Elektryczny
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Załącznik nr 3

do wniosku z dnia 25.04.2019 r.

o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego
w dziedzinie Nauk Technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika

Autoreferat

w języku polskim przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

1. Imię i Nazwisko

Marcin Wolkiewicz

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

- **Stopień doktora nauk technicznych** w dyscyplinie Elektrotechnika, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, tytuł rozprawy: „*Monitorowanie stanu uzwojeń stojana silnika indukcyjnego*”, rok 2012, promotor: prof. dr hab. inż. Czesław Kowalski, recenzenci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWR, doktorat z wyróżnieniem.
- **Dyplom ukończenia jednolitych studiów magisterskich**, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, kierunek Elektrotechnika, specjalność Inżynieria Elektryczna, tytuł pracy: „*Analiza możliwości zastosowania sygnałów mocy chwilowej i momentu elektromagnetycznego do diagnostyki silników indukcyjnych*”, rok 2007, promotor: prof. dr hab. inż. Czesław Kowalski, praca z wyróżnieniem.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

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

4. Identyfikatory naukowe i strony internetowe

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1197-8517>
- SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=35175155400>
- Google Scholar: https://scholar.google.pl/citations?hl=pl&user=KJ9_r3oAAAAJ
- Strona www: <http://www.kmnipe.pwr.edu.pl/mwolkiewicz.xml>
- Spis publikacji: <http://dona.pwr.edu.pl/szukaj/default.aspx?nrewid=457000>



5. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789)

A. Tytuł osiągnięcia naukowego

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

„Diagnostyka elektrycznych uszkodzeń silnika indukcyjnego w przekształtnikowym układzie napędowym przy wykorzystaniu metod przetwarzania sygnałów i sieci neuronowych”

Przedstawiony do oceny powiązany tematycznie cykl publikacji stanowi wkład do nauk technicznych, w zakresie dyscypliny elektrotechnika.

B. Wykaz publikacji zaliczonych do cyklu publikacji

- [1] **Grzegorz Tarchała (60%), Marcin Wolkiewicz (40%),**
Performance of the stator winding fault diagnosis in sensorless induction motor drive. Energies. 2019, Vol. 12, nr 8, art. 1507, s. 1-21.
DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/en12081507>, Punktacja MNiSW: 25; IF: **2.676**.
Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na opracowaniu metod detekcji uszkodzeń, współudziale w badaniach eksperymentalnych, przygotowaniu rysunków w zakresie wskaźników diagnostycznych, weryfikacji otrzymanych wyników badań, współredakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.
- [2] **Maciej Skowron (30%), Marcin Wolkiewicz (50%), Teresa Orłowska-Kowalska (10%), Czesław Kowalski (10%),**
Application of Self-Organizing Neural Networks to Electrical Fault Classification in Induction Motors. Applied Science. 2019, Vol. 9, nr 4, art. 616, s. 1-22.
DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/app9040616>, Punktacja MNiSW: 25; IF: **1.689**.
Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na opracowaniu koncepcji metod diagnostyki uszkodzeń elektrycznych, współudziale w wykonaniu badań eksperymentalnych, opracowaniu analizy porównawczej oraz opisu wyników, współudziale w opracowaniu systemu diagnostycznego wykorzystującego sieci samoorganizujące Kohonena, weryfikacji pracy on-line zaproponowanego systemu diagnostycznego, współredakcji tekstu artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 50%.
- [3] **Marcin Wolkiewicz (60%), Grzegorz Tarchała (30%), Teresa Orłowska-Kowalska (10%),**
Diagnosis of stator and rotor faults of an induction motor in closed-loop control structure. 24th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). Amalfi, Włochy, 20-22 czerwca 2018, s. 196-201.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445282>, Punktacja MNiSW: 15.
Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na zaproponowaniu metody diagnostyki uzwojeń silnika wykorzystującej sygnały ze struktury DFOC, współudziale

przy wykonaniu badań eksperymentalnych, wykonaniu analizy i opisu wyników badań, opracowaniu wirtualnego przyrzędu diagnostycznego pracującego on-line i sprawdzeniu jego działania w badaniach eksperymentalnych, współredakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

- [4] **Marcin Wolkiewicz (60%), Maciej Skowron (30%), Czesław Kowalski (10%),**

Electrical fault diagnostic system based on the Kohonen neural network classifier. 54th International Symposium on Electrical Machines (ISEM). Andrychów, Polska, 10-13 czerwca 2018, s. 1-6.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ISEM.2018.8442673>.

Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na współudziale w przeglądzie literatury, koncepcji metod diagnostyki uszkodzeń elektrycznych wykorzystującej sygnał strumienia poosiowego, opracowaniu i wykonaniu układu pomiarowego strumienia poosiowego, współudziale przy badaniach eksperymentalnych, analizy porównawczej i opisu uzyskanych wyników, weryfikacji działania pracy on-line zaproponowanego systemu diagnostycznego, współredakcji artykułu, wygłoszeniu referatu na konferencji. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

- [5] **Marcin Wolkiewicz (70%), Grzegorz Tarchała (30%),**

Diagnostyka uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego zasilanego z przemiennika częstotliwości w zamkniętej strukturze sterowania. Przegląd Elektrotechniczny. 2018, R. 94, nr 5, s. 147-152.

DOI: <https://dx.doi.org/10.15199/48.2018.05.26>, Punktacja MNiSW: 14, LF.

Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na zaproponowaniu metod diagnostyki uszkodzeń elektrycznych silnika wykorzystujących sygnały ze struktury DFOC, współudziale przy wykonaniu badań eksperymentalnych, wykonaniu analizy i opisu wyników badań, opracowaniu wirtualnego przyrzędu diagnostycznego pracującego on-line, sprawdzeniu pracy on-line zaproponowanego systemu diagnostycznego, redakcji tekstu artykułu. współudziale przy badaniach eksperymentalnych. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- [6] **Marcin Wolkiewicz (50%), Grzegorz Tarchała (30%), Czesław Kowalski (10%), Teresa Orłowska-Kowalska (10%),**

Stator faults monitoring and detection in vector controlled induction motor drives-comparative study. Advanced control of electrical drives and power electronic converters / ed. by Jacek Kabziński. Springer, 2017. s. 169-192.

DOI: https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-45735-2_8.

Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na zaproponowaniu metody diagnostyki uzwojeń wykorzystującej sygnały prądu stojana oraz sygnały z wewnętrznej struktury DFOC i DTC-SVM, współudziale przy wykonaniu badań eksperymentalnych, wykonaniu analizy porównawczej oraz opisu wyników badań pod kątem możliwości wykrywania uszkodzeń uzwojeń stojana, sprawdzeniu pracy on-line zaproponowanego systemu diagnostycznego, współredakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

- [7] **Marcin Wolkiewicz (50%), Grzegorz Tarchała (30%), Teresa Orłowska-Kowalska (10%), Czesław Kowalski (10%),**

Online stator interturn short circuits monitoring in the DFOC induction-motor drive. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016, vol. 63, nr 4, s. 2517-2528.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TIE.2016.2520902>, Punktacja MNiSW: 50; IF: 07.168.

Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na opracowaniu modelu silnika indukcyjnego z uszkodzonym uzwojeniem stojana, wykonaniu badań symulacyjnych, zaproponowaniu metody diagnostyki uzwojeń wykorzystującej sygnały prądu stojana oraz sygnały z wewnętrznej struktury DFOC, współudziale przy wykonaniu badań eksperymentalnych, wykonania analizy porównawczej oraz opisu wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych pod kątem możliwości wykrywania uszkodzeń uzwojeń stojana, opracowania wirtualnego przyrządu pomiarowego pracującego on-line, sprawdzeniu pracy on-line zaproponowanego systemu diagnostycznego, współredakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

- [8] **Marcin Wolkiewicz (40%), Piotr P. Sobański (20%), Grzegorz Tarchała (20%), Teresa Orłowska-Kowalska (10%), Czesław Kowalski (10%),**

Electrical faults diagnosis in the induction motor drive under the direct field oriented control. 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG). Bydgoszcz, Polska, 29 czerwca - 1 lipca 2016, s. 280-285.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/CPE.2016.7544200>, Punktacja MNiSW: 15.

Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na zaproponowaniu koncepcji metod diagnostyki uzwojeń stojana oraz uszkodzeń tranzystorów wykorzystującej sygnały prądu stojana, przygotowaniu stanowiska oraz wykonaniu badań eksperymentalnych, wykonaniu analizy oraz opisu wyników pod kątem możliwości wykorzystania metody SCA prądu stojana do wykrywania uszkodzeń tranzystorów i uzwojeń stojana, opracowaniu oraz weryfikacji działania wirtualnego przyrządu diagnostycznego pracującego on-line, współredakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 40%.

- [9] **Marcin Wolkiewicz (80%), Czesław Kowalski (20%),**

Incipient stator fault detector based on neural networks and symmetrical components analysis for induction motor drives. 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE). Rzeszów, Polska, 4-8 maja 2016, s. 1-7.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/WZEE.2016.7800214>, Punktacja MNiSW: 15.

Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na opracowaniu przeglądu literatury, opracowaniu koncepcji metod diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojan, przygotowaniu analizy i opisu uzyskanych wyników badań, opracowaniu systemu diagnostycznego wykorzystującego sieci perceptronowe MLP do diagnostyki uszkodzeń, przeprowadzeniu testów off-line sieci neuronowych oraz weryfikacji pracy on-line zaproponowanego detektora uszkodzeń, współredakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

- [10] **Marcin Wolkiewicz (60%), Grzegorz Tarchała (30%), Czesław Kowalski (10%),**
Stator windings condition diagnosis of voltage inverter-fed induction motor in open and closed-loop control structures. Archives of Electrical Engineering. 2015, vol. 64, nr 1, s. 67-79.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1515/aee-2015-0007>, Punktacja MNiSW: 15; LF.
Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na zaproponowaniu koncepcji metod wykrywania uszkodzeń uzwojeń stojana, współudziale przy wykonaniu badań eksperymentalnych, wykonaniu analizy i opisu wyników badań, współudziale przy redakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 60%.
- [11] **Marcin Wolkiewicz (60%), Grzegorz Tarchała (30%), Czesław Kowalski (10%),**
Monitoring of stator inter-turn short circuits in the direct field oriented controlled induction motor. 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC). Antalya, Turcja, 21-24 września 2014, s. 1066-1071.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980650>, Punktacja MNiSW: 15.
Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji artykułu, zaproponowaniu metod diagnostycznych, wykonaniu badań eksperymentalnych, opracowaniu wyników badań i poddaniu ich analizie, współredakcji artykułu oraz wygłoszeniu referatu na konferencji. Mój udział procentowy szacuję na 60%.
- [12] **Marcin Wolkiewicz (80%), Czesław Kowalski (20%),**
On-line neural network-based stator fault diagnosis system of the converter-fed induction motor drive. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Wiedeń, Austria, 10-14 listopada 2013, s. 5561-5566.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/IECON.2013.6700044>, Punktacja MNiSW: 15.
Mój wkład w powstanie niniejszej pracy polegał na koncepcji metod diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana, wykonaniu badań eksperymentalnych oraz opisu wyników pod kątem możliwości wykorzystania wybranych metod diagnostyki do wykrywania i lokalizacji uszkodzeń, opracowaniu idei detektora neuronowego oraz testów on-line zaproponowanego systemu diagnostycznego, a także redakcji artykułu oraz wygłoszeniu referatu na konferencji. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

Wyniki badań prezentowałem w czasopismach indeksowanych według JCR [1], [2], [7], czasopismach wymienionych na liście ministerialnej [5], [10], w rozdziale monografii [6] oraz na znaczących konferencjach międzynarodowych [2-3], [8-9], [11-12]. W tabeli 1 zamieszczono zestawienie najistotniejszych informacji dotyczących cyklu publikacji powiązanych tematycznie, stanowiących podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.

Tabela 1. Analiza cyklu publikacji powiązanych tematycznie.

Nr publikacji	Nazwa czasopisma/konferencji	Impact Factor	Punktacja wg MNiSW	Wkład wnioskodawcy	Rok publikacji
[1]	Energies	2,676	25	40	2019
[2]	Applied Science	1,689	25	50	2019
[3]	International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion	-	15	60	2018
[4]	International Symposium on Electrical Machines	-	-	60	2018
[5]	Przegląd Elektrotechniczny	-	15	70	2018
[6]	Advanced control of electrical drives and power electronic converters, Springer	-	-	50	2017
[7]	IEEE Transactions on Industrial Electronics	7,168	50	50	2016
[8]	International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering	-	15	40	2016
[9]	Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics	-	15	80	2016
[10]	Archives of Electrical Engineering.	-	15	60	2015
[11]	International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition	-	15	60	2014
[12]	Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society	-	15	80	2013
	SUMA:	11,533	205		

Współczynniki prezentujące jakościową ocenę moich publikacji naukowych

Sumaryczny współczynnik IF (Impact Factor) opracowań załączonych do cyklu publikacji powiązanych tematycznie (zgodny z datą publikacji) wynosi **11,533**, natomiast z uwzględnieniem udziału procentowego **5,4989**.

Łączna liczba punktów publikacji wg listy MNiSW wynosi **205**, natomiast z uwzględnieniem udziału procentowego habilitanta **115**. Mój średni udział procentowy w przygotowaniu publikacji wchodzących w skład cyklu wynosi **58,3%**, przy minimalnym udziale wynoszącym **40%**.



Na podstawie opracowania Centrum Wiedzy i Informacji Naukowo-Technicznej Politechniki Wrocławskiej (z dnia 17.04.2019):

- Łączna liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań) wszystkich publikacji według *Web of Science* wynosi **66** (za lata 2007-2019), przy czym **63** z nich dotyczy prac opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora.
- Łączna liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań) wszystkich publikacji według *Scopus* wynosi **69** (za lata 2007-2019), przy czym **67** z nich dotyczy prac opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora.
- Łączna liczba cytowań (z wyłączeniem autocytowań) wszystkich publikacji według *Publish or Perish* wynosi **123** (za lata 2007-2019), przy czym **91** z nich dotyczy prac opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora
- Indeks Hirscha według bazy *Web of Science*: **5**.
- Indeks Hirscha według bazy *Scopus*: **6**.
- Indeks Hirscha według bazy *Publish or Perish*: **7**.

C. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Tematyka badań przedstawiona w cyklu publikacji obejmuje zagadnienia wczesnego wykrywania uszkodzeń obwodów stojana i wirnika silnika indukcyjnego klatkowego zasilanego z przemiennika częstotliwości, przy wykorzystaniu zaawansowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów diagnostycznych oraz sztucznych sieci neuronowych. Zawiera ona wybrane oryginalne osiągnięcia naukowe, które są kontynuacją i rozszerzeniem badań realizowanych w rozprawie doktorskiej oraz w projektach badawczych.

Obiektem badań były silniki indukcyjne klatkowe pracujące w napędzie przekształtnikowym w otwartej strukturze sterowania skalarnego oraz zamkniętej strukturze sterowania wektorowego. Badania były realizowane na silnikach fabrycznych, przystosowanych do fizycznego modelowania uszkodzeń elektrycznych (uszkodzenia uzwojenia stojana – specjalnie przezwojony stojan z odczepami zwojów wyprowadzonymi na zewnętrzną tabliczkę zaciskową oraz uszkodzenia prętów wirnika - w postaci specjalnie spreparowanych wirników).

Silniki elektryczne wraz z maszyną roboczą, układami zasilania i sterowania są narażone na występowanie różnych uszkodzeń pomimo stosowania elementów i materiałów charakteryzujących się wysoką niezawodnością. Spośród wszystkich defektów, uszkodzenia obwodów elektrycznych silnika indukcyjnego stanowią blisko 50% wszystkich awarii silnika. Uszkodzenia uzwojeń stojana są jednym z najczęstszych i obejmują około 37% wszystkich awarii. Uszkodzenie uzwojenia stojana rozpoczyna się od zwarcia zwojowego, niezauważalnego przez zewnętrzne (konwencjonalne) układy zabezpieczeń, które ostatecznie rozprzestrzenia się na całym uzwojeniu, powodując zwarcie główne. Prowadzi to do awaryjnego zatrzymania napędu i konieczności natychmiastowej wymiany silnika lub jego naprawy, co powoduje przestój w pracy oraz generuje dodatkowe duże koszty. Postępy w projektowaniu i technologii produkcji wirników spowodowały znaczne ograniczenie występowania awarii wirników klatkowych niemniej jednak pęknięcia prętów lub ich połączenia z pierścieniem zwierającym stanowią blisko 13% awarii silników indukcyjnych. Częstość występowania uszkodzeń obwodów elektrycznych stojana i wirnika i związanych z tym zakłóceń w procesie technologicznym i generowaniem dużych strat ekonomicznych

w pełni uzasadnia konieczność wczesnego wykrywania uszkodzeń w silniku i dostarczenie tej informacji do obsługi napędu.

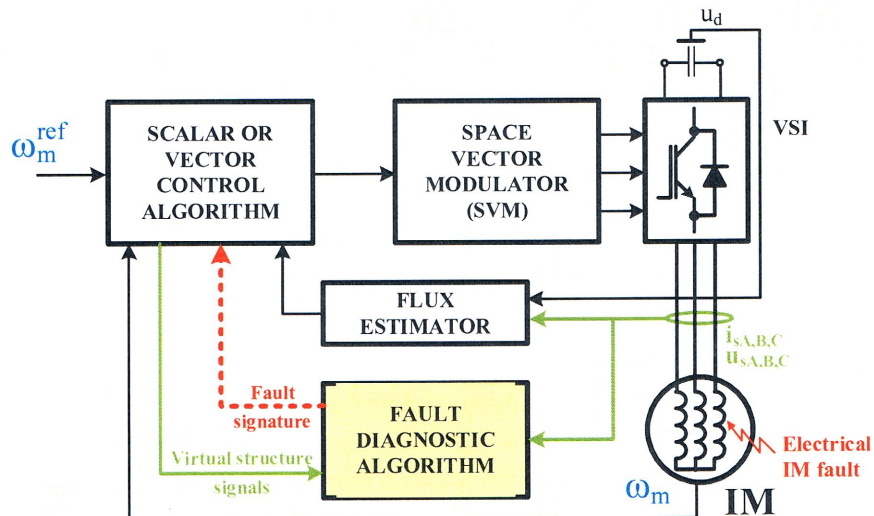
Silniki indukcyjne, pracujące we współczesnych napędach wyposażonych w przekształtniki częstotliwości, są narażone na wyżej wymienione uszkodzenia elektryczne w jeszcze większym stopniu niż przy zasilaniu bezpośrednio z sieci. Wynika to między innymi z charakteru napięcia zasilania (wysokoczęstotliwościowa modulacja PWM), pracy napędu zamkniętej strukturze sterowania przy zmiennym obciążeniu oraz szerokim zakresie regulacji częstotliwości napięcia zasilania (duży zakres zmian prędkości obrotowej). Powoduje to konieczność modyfikacji diagnostyki uszkodzeń w obszarze wyboru sygnałów diagnostycznych oraz metod ich przetwarzania.

Problematyka wykrywania uszkodzeń elektrycznych w niskonapięciowych silnikach indukcyjnych zasilanych z przemienników częstotliwości, pracujących w otwartych strukturach sterowania skalarnego oraz zamkniętych strukturach sterowania wektorowego, jest stosunkowo słabo zbadanym zagadnieniem. Obecnie silniki niskonapięciowe, zasilane z przekształtników częstotliwości, są zabezpieczane na ogólnych zasadach zabezpieczeń głównych obwodów zasilających z uwzględnieniem narażeń wynikających ze stosowania przemienników częstotliwości. Jednakże brak jest sformułowanych wymagań odnośnie zabezpieczeń na występowanie uszkodzeń elektrycznych w obwodach stojana i wirnika. Natomiast przekształtniki mają zazwyczaj wbudowane zabezpieczenia reagujące na zagrożenia spowodowane ich uszkodzeniami lub niebezpiecznymi warunkami pracy. Rozbudowa możliwości funkcjonalnych zabezpieczeń w aktualnie dostępnych przemiennikach częstotliwości ulega ciągłemu rozszerzeniu. Jednakże w ograniczonym zakresie uwzględnia się w nich informację diagnostyczną dostępną w systemach monitorujących pracę maszyny elektrycznej.

Procesory wbudowane w układy sterujące przekształtnikami częstotliwości posiadają dużą moc obliczeniową ze względu na realizację w czasie rzeczywistym szeregu złożonych algorytmów związanych z estymacją m.in. parametrów schematu zastępczego, strumienia, momentu elektromagnetycznego, prędkości kątovej oraz z dobozem nastaw regulatorów i modulacją wektorową. Natomiast stosunkowo niedużym kosztem możliwe jest rozszerzenie funkcjonalności układu sterowania przemiennika poprzez dodanie dodatkowych algorytmów związanych z wykrywaniem wczesnych uszkodzeń stojana i wirnika. Realizacja funkcji diagnostycznych może być realizowana poprzez ocenę symptomów uszkodzeń, wyodrębnianych z sygnałów mierzonych na silniku lub dostępnych w strukturze sterowania przemiennika. Na rys. 5.1 przedstawiono ideę systemu sterowania napędem przekształtnikowym z dodatkowymi funkcjami diagnostycznymi. *Realizacja systemów umożliwiających jednoczesną realizację funkcji sterujących i diagnostycznych jest w ostatnich latach podstawowym celem moich badań naukowych.*

W przypadku uszkodzeń uzwojeń stojana lub wirnika silnika, pracującego w systemie napędowym sterowanym wektorowo, zmiana parametrów uzwojeń, spowodowana tymi uszkodzeniami, powoduje zakłócenia działania całej struktury sterowania (np. niewłaściwa wartość estymowanego strumienia stojana, wirnika). Niekontrolowane zwiększenie stopnia uszkodzenia, w czasie gdy system sterujący nie podejmuje właściwych działań, spowodowuje w konsekwencji niestabilną pracę układu napędowego. Dlatego ważne jest, aby wykryć możliwie wczesny etap uszkodzenia uzwojeń silnika i zabezpieczyć układ napędowy przed awaryjnym wyłączeniem lub awarią.





Rys. 5.1. System sterowania napędem przekształtnikowym z dodatkowymi funkcjami diagnostycznymi

Ze względu na działanie struktury sterowania wektorowego (kompensującej „ukrywającej” do pewnego momentu wystąpienie uszkodzenia), regulację częstotliwości zasilania, występowanie zakłóceń, niestacjonarność sygnałów diagnostycznych, niezbędne staje poszukiwanie nowych metod pozyskiwania informacji diagnostycznej i sposobów jej przetwarzania w celu prawidłowej oceny aktualnego stanu technicznego silnika.

Na podstawie własnego doświadczenia i aktualnego stanu wiedzy postawiłem sobie za zadanie opracowanie metod diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana i wirnika silnika pracującego w zamkniętej strukturze sterowania ze szczególnym uwzględnieniem nowych metod analizy i przetwarzania sygnałów.

Mając na uwadze aktualny stan wiedzy wytyczyłem następujące cele naukowe:

1. Opracowanie *skutecznych metod jednoczesnej diagnostyki uzwojeń stojana i wirnika silnika indukcyjnego* pracującego w przekształtnikowym układzie napędowym, realizowanej on-line na podstawie analizy widmowej (FFT), składowych głównych (PCA), składowych symetrycznych (SCA):
 - sygnałów diagnostycznych dostępnych pomiarowo na obiekcie (prądy fazowe, przesunięcie fazowe, strumień poosiowy),
 - sygnałów wirtualnych dostępnych w programowej strukturze sterowania napędem.
2. Opracowanie metod przetwarzania informacji diagnostycznej umożliwiających detekcję, klasyfikację i ocenę stopnia uszkodzenia przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych

Cel nr 1 został przedstawiony w publikacjach: [1], [3], [5-8], [10-11]. Publikacje [3] i [5] dotyczą jednoczesnej diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana i wirnika, natomiast [1], [6-8] i [10-11] badań napędu przekształtnikowego z silnikiem indukcyjnym i uszkodzonym uzwojeniem stojana. Badania weryfikujące opracowane metody diagnostyczne zostały zrealizowane na specjalnie przezwojonych silnikach małej mocy, umożliwiającym modelowanie fizyczne zwarcia jednego i/lub kilku zwojów w obrębie pojedynczej fazy silnika.

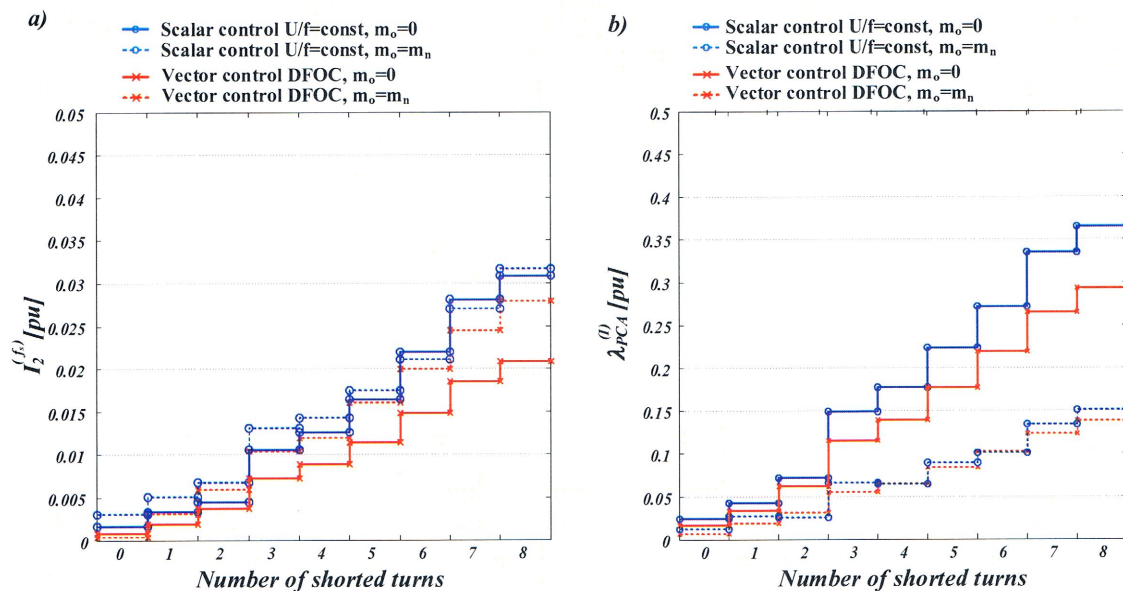
Uszkodzenia wirnika natomiast były realizowane na kilku wariantach specjalnie spreparowanych wirników z przewierconymi prętami klatki.

W badaniach laboratoryjnych używałem dwóch niezależnych systemów komputerowych. Pierwszy, z procesorem sygnałowym czasu rzeczywistego dSpace 1103, służył do sterowania napędem. Program kontrolny został napisany w języku C w środowisku ControlDesk i umożliwiał pomiar sygnałów na obiekcie (prądy fazowe stojana oraz napięcie w układzie pośredniczącym), transformację zmiennych, estymację sygnałów niemierzalnych, modulację SVM oraz sterowanie napędem wybraną metodą.

Drugi system przeznaczony był do realizacji algorytmów związanych z funkcjami diagnostycznymi. Stanowił go kontroler przemysłowy National Instruments NI PXIe 8133 z kartą pomiarową NI PXI 4472, umożliwiającą niezależną akwizycję sygnałów z 8 kanałów różnicowych. Programy diagnostyczne zostały opracowane w środowisku LabView i stanowiły odrębne wirtualne przyrządy diagnostyczne, zapewniające pomiar wybranych sygnałów oraz ich analizę wybraną metodą w celu wyodrębnienia symptomów uszkodzeń. Oba systemy, ze względu na laboratoryjny charakter oraz realizowane funkcje, pracowały niezależnie. Jednakże możliwe jest docelowe połączenie funkcji sterujących i diagnostycznych w jednym systemie komputerowym.

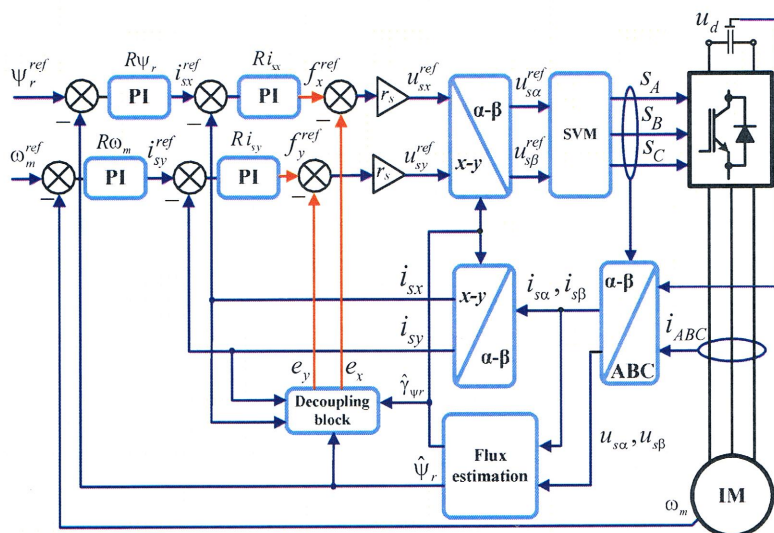
W publikacji [10] celem badań była ocena przydatności dwóch opracowanych metod do wczesnego wykrywania zwarć zwojowych w silniku indukcyjnym, pracującym zarówno w otwartej (sterowanie skalarne $U/f=\text{const}$) i zamkniętej strukturze sterowania (sterowanie polowo zorientowane DFOC). Jedna metoda wykorzystywała analizę składowych głównych PCA (ang. Principal Component Analysis) natomiast druga analizę składowych symetrycznych SCA (ang. Symmetrical Component Analysis).

Analiza przebiegów prędkości kątowej, prądów fazowych stojana oraz estymowanego strumienia wirnika wykazała, zarówno dla sterowania w układzie otwartym jak i zamkniętym niewielki wpływ uszkodzenia na zamiany ilościowe i jakościowe w amplitudach analizowanych sygnałów. Skłoniło mnie to do zastosowania innych metod przetwarzania sygnałów i sprawdzenia czy umożliwią one wykrycie zwarcia pojedynczych zwojów w obu układach sterowania napędem. Do szczegółowej analizy diagnostycznej wziąłem pod uwagę dostępne pomiarowo prądy fazowe stojana oraz napięcia międzyfazowe, które zostały poddane przetwarzaniu metodami PCA i SCA. Na rys. 5.2 przedstawiłem wybrane wyniki badań eksperymentalnych. Można zauważyć wyraźny wzrost wartości analizowanych symptomów uszkodzenia wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia. Przeprowadzone badania eksperymentalne i analiza składowych symetrycznych i składowych głównych umożliwiła mi sformułowanie wniosku, że jest możliwa **skuteczna diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana** na podstawie oceny *amplitudy składowej przeciwnej prądu stojana* oraz monitorowania zmian *wartość głównych obliczonych dla wektora przestrzennego prądu stojana*. Skuteczność wykrywania uszkodzeń jest zachowana pomimo efektu kompensacji symptomów wystąpienia zwarcia przez układ sterowania. Dodatkowo przeanalizowałem wpływ zmiany częstotliwości napięcia zasilania (dla sterowania $u/f=\text{const}$), zadanej prędkości kątowej (dla sterowania DFOC) oraz momentu obciążenia na intensywność zmian wskaźników uszkodzeń. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdziłem, że jest możliwe wykrycie pojedynczych zwojów zwartych przy zmianach w szerokich przedziałach częstotliwości napięcia zasilania (prędkości kątowej) oraz momentu obciążenia. Ponadto otrzymane rezultaty wykazały, że jest możliwa i uzasadniona budowa aplikacji diagnostycznej monitorującej na bieżąco zmiany wskaźników uszkodzenia, otrzymywanych na podstawie analiz PCA i SCA.



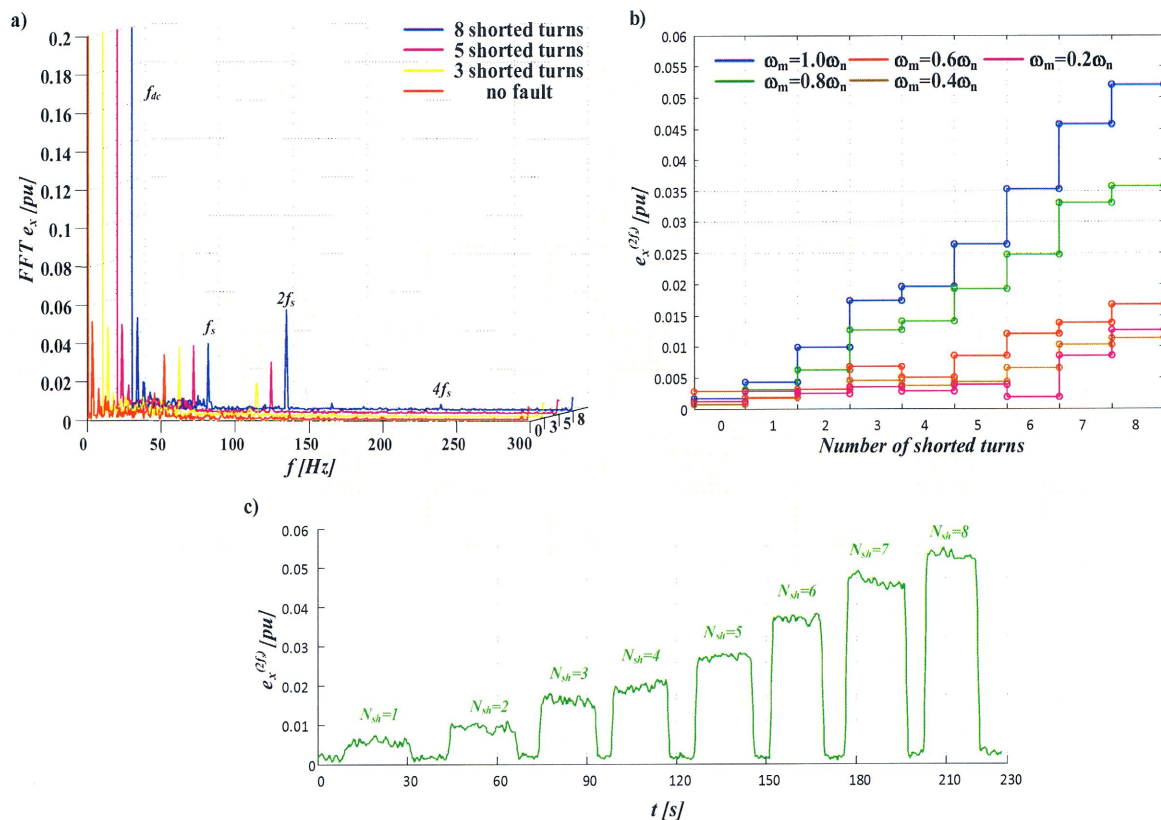
Rys. 5.2. Zmiana a) składowej przeciwnej prądu stojana, b) wskaźnika zmian wartości głównych prądu stojana dla pracy silnika bez obciążenia i z obciążeniem znamionowym dla różnych poziomów uszkodzeń i różnych struktur sterowania

Inne podejście do wykrywania uszkodzeń w stanie silnika indukcyjnego pracującego w napędzie ze sterowaniem wektorowym przedstawiłem w referacie [11]. Zaproponowałem prostą metodę wykrywania zwartych zwojów poprzez wykorzystanie wirtualnych sygnałów dostępnych w programowej strukturze sterowania wektorowego polowo-zorientowanego (DFOC). Przy wyborze wewnętrznych sygnałów diagnostycznych kierowano się możliwością wykrycia możliwie wczesnej fazy uszkodzenia uzwojenia stojana tak, aby wyprzedzić zadziałanie zabezpieczeń zwarciovych. Takie podejście daje możliwość implementacji wybranych metod diagnostycznych bezpośrednio w strukturę sterowania i w przypadku wykrycia uszkodzenia odpowiednią reakcją układu sterowania. W trakcie badań pod uwagę wziąłem zadane sygnały sterujące (f_x, f_y) i odsprzęgające (e_x, e_y) struktury wewnętrznej (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Schemat blokowy polowo zorientowanej struktury sterowania SI (DFOC)

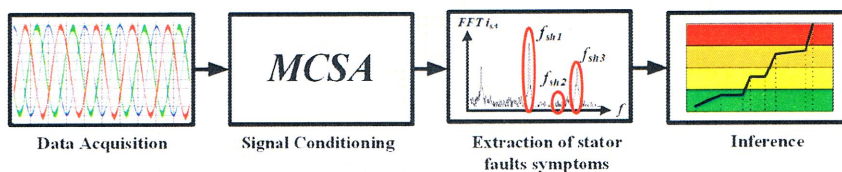
W pierwszej kolejności sprawdziłem reakcje sygnałów wewnętrznych na pojawiające się w trakcie normalnej pracy uszkodzenia stojana (zwarcie kilku zwojów w obrębie jednej fazy silnika). Pomimo niewielkiego wpływu zwarcia kilku zwojów na prądy fazowe stojana, zauważyłem znaczące zmiany wartości amplitudy w sygnałach wirtualnych. Do szczegółowej analizy tych sygnałów zastosowałem analizę widmową FFT, dzięki której możliwe było dokładne określenie zmian składowych częstotliwościowych w widmie analizowanych sygnałów. Umożliwiło to wyodrębnienia symptomów uszkodzenia w postaci wskazania charakterystycznych częstotliwości, dla których, po wystąpieniu uszkodzenia, następuje zmiana wartości amplitudy. Po przeanalizowaniu różnych przypadków pracy napędu przekształtnikowego przy zmianach: prędkości zadanej, momentu obciążenia oraz stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana wyodrębniłem dwie składowe, składowa stała f_{dc} oraz składowa o podwójnej częstotliwości napięcia zasilania $2f_s$. Badania wykazały, że tylko informacja o amplitudzie składowej $2f_s$ może prawidłowo wskazywać na wystąpienie uszkodzenia uzwojeń stojana w różnych warunkach pracy napędu. Na rys. 5.4 przedstawiłem proces analizy sygnału e_x począwszy od przetwarzania z wykorzystaniem analizy FFT (rys. 5.4a), wyodrębniania symptomów uszkodzenia (rys. 5.4b) oraz monitorowania on-line zmian wartości amplitudy składowej $2f_s$ dla różnych stopni uszkodzenia uzwojenia stojana (rys. 5.4c). Pozytywne wyniki badań eksperymentalnych umożliwiły opracowanie wirtualnego przyrządu diagnostycznego, monitorującego w czasie rzeczywistym pracę napędu na podstawie zmian wartości amplitudy charakterystycznej częstotliwości w sygnale wewnętrznym e_x .



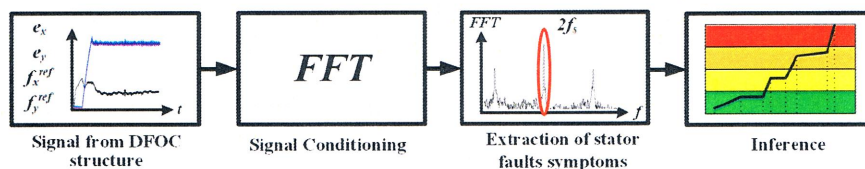
Rys. 5.4. Wpływ uszkodzenia uzwojenia stojana silnika obciążonego znamionowo na: a) widmo FFT sygnału odprzęgającego e_x , b), c) wartość składowej $2f_s$ sygnału odprzęgającego e_x

Praktyczna realizacja monitorowania stanu stojana według zaproponowanego podejścia wiąże się z koniecznością wdrożeniem dodatkowych procedur diagnostycznych w oprogramowaniu systemu sterowania napędu. Należy zauważyć, że implementacja takich algorytmów i ich realizacja nie powinna stanowić problemu w przypadku nowoczesnych mikroprocesorów wbudowanych w układy sterowania współczesnych przemienników częstotliwości.

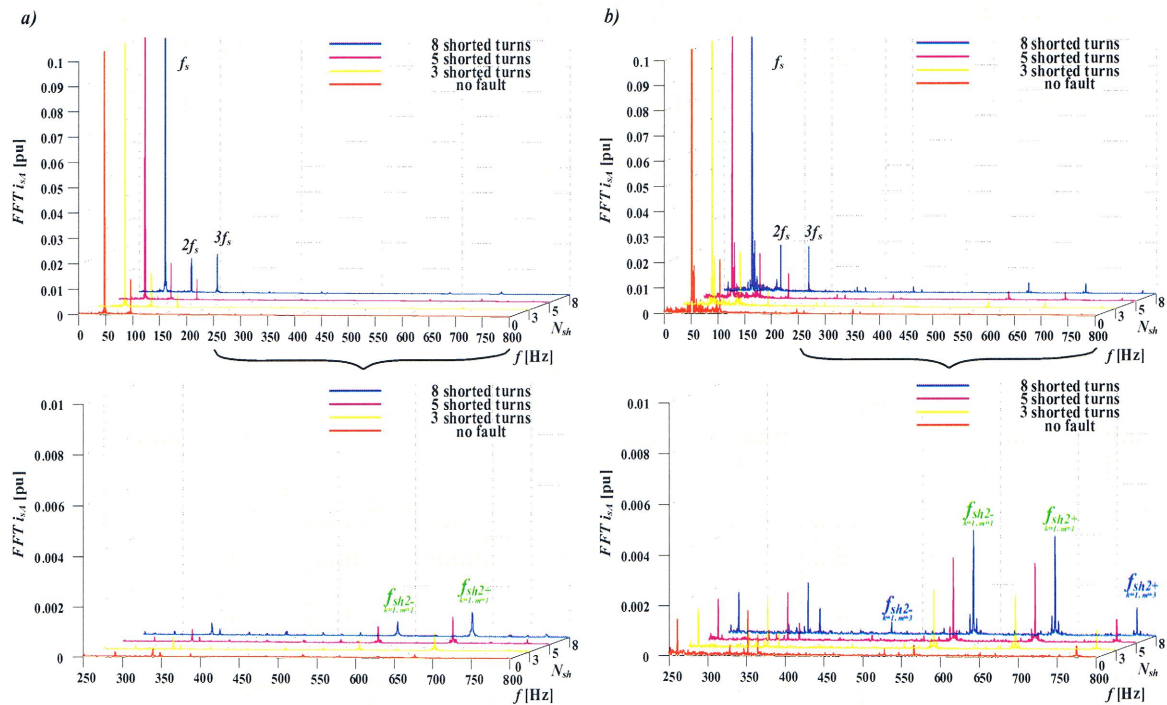
Jedną z najczęściej stosowanych metod w diagnostyce maszyn elektrycznych jest klasyczna analiza widmowa prądu stojana (ang. Motor Current Signature Analysis). Dlatego w publikacji [7] postanowiłem zweryfikować skuteczność metody MCSA i porównać ją z metodą opartą na analizie widmowej sygnałów wirtualnych dostępnych w strukturze sterowania w odniesieniu do wykrywania zwarć zwojowych w stojanie. Weryfikacja została przeprowadzona zarówno w badaniach symulacyjnych jak i eksperymentalnych. Na rys. 5.5 i 5.6 przedstawiłem etapy przetwarzania sygnałów diagnostycznych z zastosowaniem przytoczonych metod. W części symulacyjnej, wykonanej w środowisku Matlab-Simulink, wykorzystałem model silnika indukcyjnego z uszkodzonym uzwojeniem stojana, rozszerzony o układ sterowania wektorowego (sterowanie połowo zorientowane DFOC). Analiza czasowa wybranych sygnałów wewnętrznych i zewnętrznych potwierdziła niewielki wpływ zwarcia kilku zwojów na zmiany wartości chwilowych sygnałów. Pojawiające się, po wystąpieniu uszkodzenia, dodatkowe oscylacje sygnałów mogą być charakterystyczne również dla innych rodzajów asymetrii. Natomiast zmiany ilościowe w wartościach prądów stojana są niewystarczające do zadziałania zabezpieczeń przemysłowych. Dlatego niezbędne było zastosowanie analizy widmowej wybranych sygnałów. Widmo prądu fazowego stojana wykazało, że po wystąpieniu zwarcia znaczące zmiany ma tylko amplituda częstotliwości $3f_s$ (rys. 5.7). Zmiany te silnie zależą od warunków pracy silnika (prędkości kątowej i momentu obciążenia), co znacznie utrudnia diagnostykę uszkodzenia. W przypadku napędów przekształtnikowych problem ten jest większy ze względu na zniekształcony sygnał prądowy i zmienne warunki pracy. Tak więc klasyczna analiza widmowa prądu fazowego stojana nie rozwiązuje problemu wczesnego wykrywania zwarć i oceny poziomu powstałej asymetrii. Dlatego wziąłem pod uwagę zadane sygnały sterujące f_x i f_y oraz sygnały z układu odsprzęgającego e_x i e_y . Szczegółowa analiza została przeprowadzona dla wszystkich 4 sygnałów, natomiast w artykule zostały przedstawione tylko wyniki dla sygnału e_x .



Rys. 5.5. Procedura diagnostyczna uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego z zastosowaniem metody MCSA



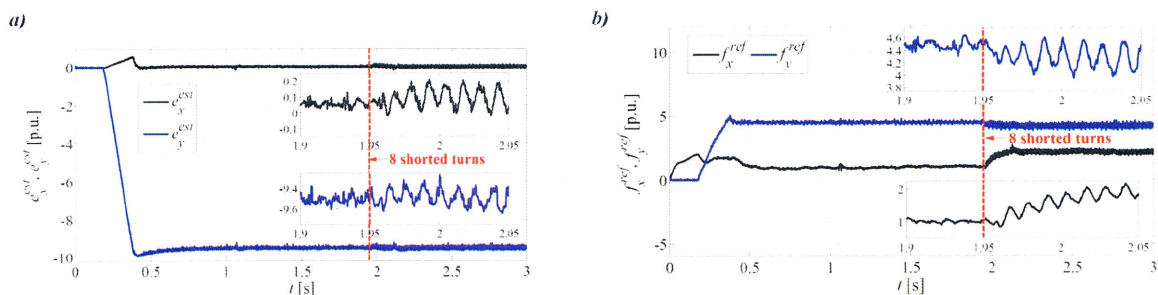
Rys. 5.6. Procedura diagnostyczna uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego z zastosowaniem analizy widmowej sygnałów wewnętrznych struktury sterowania



Rys. 5.7. Analiza widmowa prądu stojana dla pracy w DFOC z kilkoma zwartymi zwojami przy nominalnej prędkości dla: a) pracy bez obciążenia i b) pracy przy obciążeniu nominalnym

Przebiegi wartości chwilowych wykazały zmianę wartości średniej oraz pojawienie się dodatkowych dużych oscylacji po pojawieniu się uszkodzenia (rys. 5.8). Pojawiające się po wystąpieniu asymetrii, oscylacje w przebiegach sygnałów wewnętrznych są skutkiem wystąpienia dodatkowej składowej $2f_s$. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono dużą zależność wartości jej amplitudy od liczby zwartych zwojów oraz niewielki wpływ momentu obciążenia.

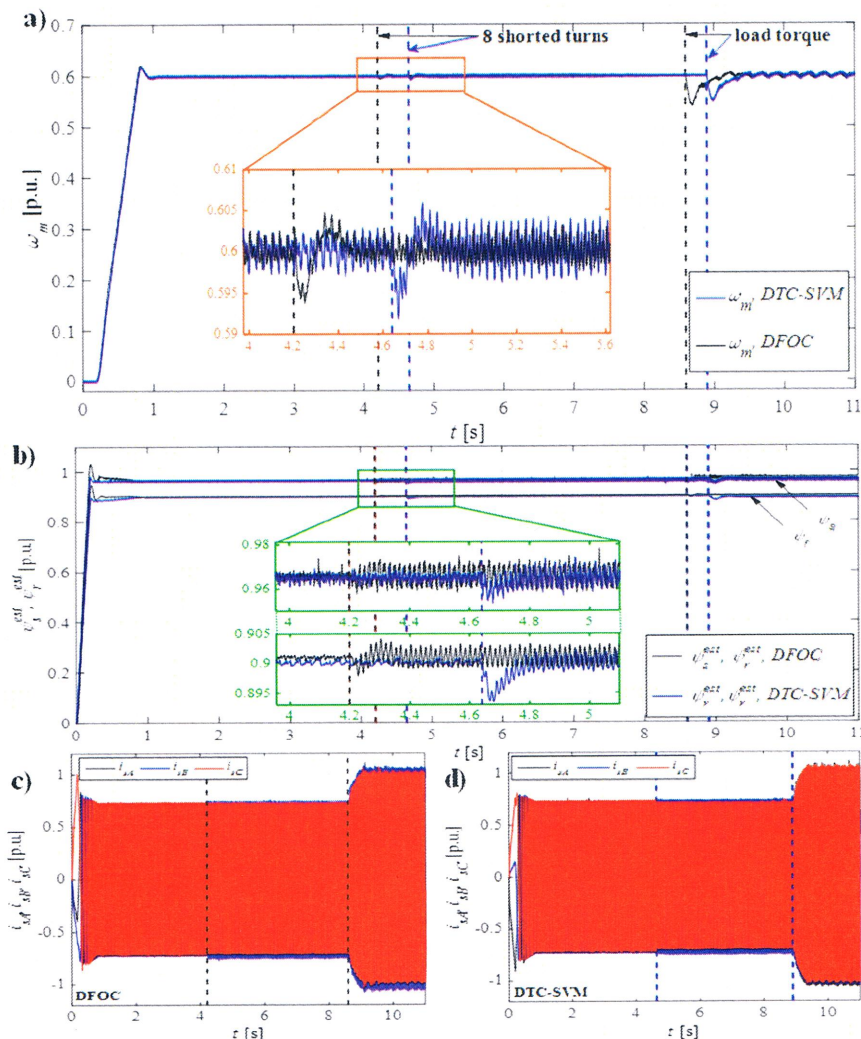
Pozytywne wyniki badań eksperymentalnych, potwierdzające założenia modelowe przyczyniły się do opracowania koncepcji i wstępnych testów aplikacji diagnostycznej pracującej w czasie rzeczywistym napędu. Wykorzystano w niej analizę widmową sygnałów wirtualnych oraz bieżące monitorowanie zmian wartości amplitudy składowej $2f_s$ dla napędu pracującego bez obciążenia i z obciążeniem znamionowym. Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić pełną przydatność sygnałów wewnętrznych struktury sterowania (e_x, e_y, f_x, f_y) do oceny stanu uzwojeń.



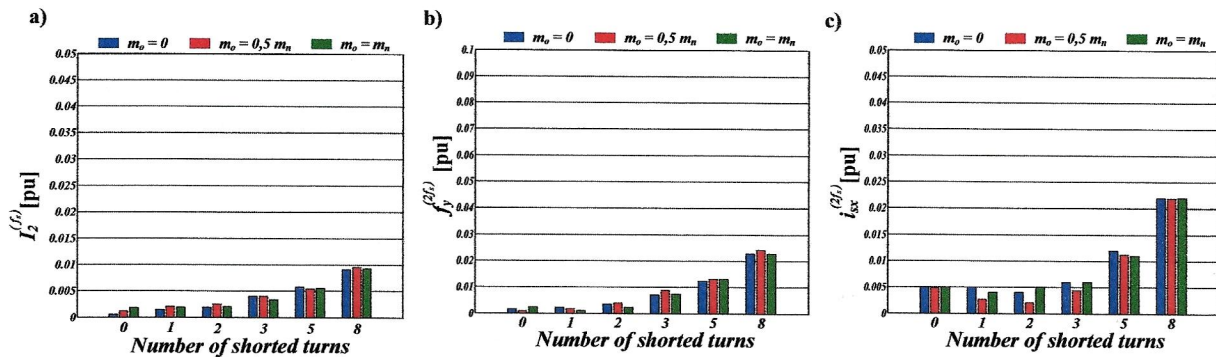
Rys. 5.8. Praca z napędem IM w strukturze DFOC w przypadku zwarcia ośmiu zwojów: a) sygnały odprężające e_x i e_y , b) zadane sygnały sterujące f_x i f_y

Proponowana metoda diagnostyki uzwojeń może być z powodzeniem uzupełniona dodatkowo o metody wnioskowania bazujące na sztucznej inteligencji, które pozwolą na automatyzację procesu kwalifikacji i oceny poziomu uszkodzenia.

Kolejnym zagadnieniem było sprawdzenie opracowanych metod diagnostycznych dla innej niż DFOC struktury sterowania napędem przekształtnikowym [6]. Uwaga moja została skupiona na bezpośrednim sterowaniu momentem DTC-SVM. W pierwszej kolejności sprawdziłem wpływ uszkodzenia stojana, w postaci kilku zwojów zwartych, na działanie układu napędowego. W badaniach wykorzystałem wcześniejsze doświadczenia związane z układem sterowania DFOC. Analiza porównawcza przebiegów przy niewielkim zwarciu zwojowym (około 3% całego uzwojenia) potwierdziła przypuszczenia o minimalnym jego wpływie na działanie napędu. W analizowanych sygnałach (prędkość obrotowa, strumienie stojana i wirnika, prądy fazowe stojana) brak jest widocznych zmian przy tak małym stopniu uszkodzenia stojana (rys. 5.9). Niewielkie oscylacje nie wpływają na pracę napędu nawet podczas zmiany obciążenia silnika. Brak reakcji na początkową fazę uszkodzenia spowodowałyby szybki proces rozprzestrzeniania się uszkodzenia na całe uzwojenie, niestabilną pracę układu i w konsekwencji awaryjne zatrzymanie.



Rys. 5.9. Przebiegi napędu wektorowego podczas zwarcia zwojowego: a) prędkość, b) amplitudy strumienia stojana i wirnika, c) prądy fazowe dla DFOC, d) prądy fazowe dla DTC-SVM

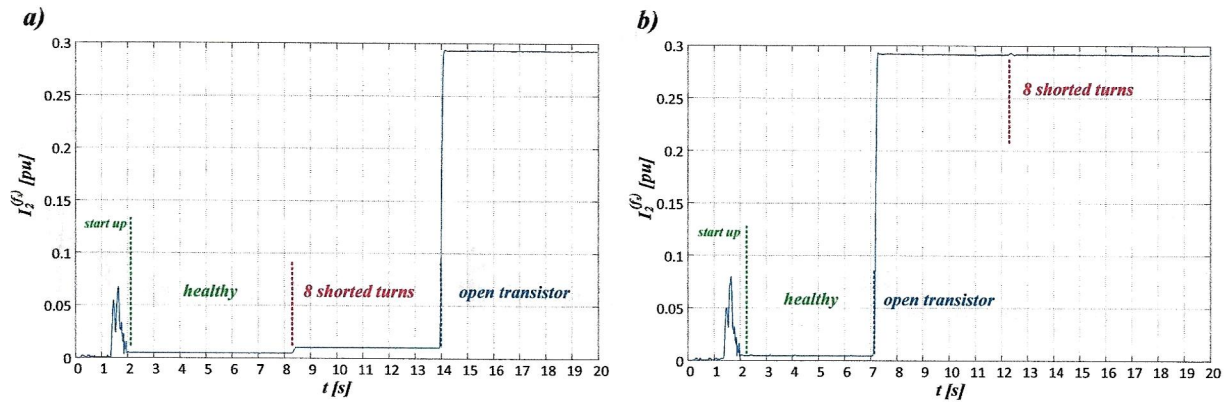


Rys. 5.10. Wpływ zmian momentu obciążenia oraz stopnia uszkodzenia na: a) składową przeciwną prądu stojana I_2 , b) sygnał sterujący f_y , c) składową prądu stojan i_{sx}

Analizując wewnętrzne sygnały ze struktury sterowania DTC-SVM można, podobnie jak dla DFOC, zauważyć zmiany w wartościach średnich sygnałów oraz pojawienie się oscylacji. Wykorzystując wcześniej opracowane i sprawdzone metody dla układów ze sterowaniem skalarnym i wektorowym, zastosowałem analizę składowych symetrycznych oraz analizę widmową sygnałów wirtualnych dla sterowania DTC-SVM. Wyniki badań, otrzymane przy wykorzystaniu opracowanej aplikacji pomiarowo-diagnostycznej, pracującej on-line, potwierdziły dużą skuteczność wykrywania początkowego uszkodzenia uzwojenia stojana. W procedurze diagnostycznej wykorzystano zmiany składowej symetrycznej przeciwniej prądu stojana I_2 oraz zmiany wartości amplitudy charakterystycznej częstotliwości $2f_s$ sygnałów wewnętrznych f_y oraz i_{sx} . Na rys. 5.10 przedstawiłem zmiany wartości wybranych symptomów uszkodzenia pod wpływem zwarcia kilku zwojów uzwojenia stojana. Widoczny jest silny wzrost wartości przy wzroście stopnia uszkodzenia.

Zastosowane procedury diagnostyczne mogą być z powodzeniem wykorzystane w uniwersalnym detektorze uszkodzeń stojana napędu przekształtnikowego, wbudowanym w strukturę sterowania.

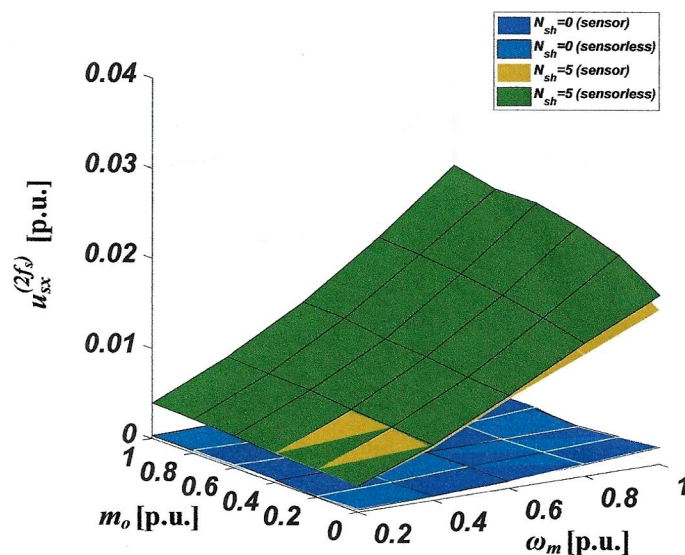
W publikacji [8] przedstawiono wyniki badań związane z problemem wykrycia uszkodzenia uzwojenia stojana silnika, pracującego w strukturze sterowania DFOC, przy jednoczesnym wystąpieniu awarii w układzie zasilania napędu przekształtnikowego. Pod uwagę wziąłem często występujące uszkodzenie w postaci permanentnie otwartego tranzystora w układzie zasilania, które w układach przemysłowych może być spowodowane wadliwymi działaniami sterowników bramek IGBT, jak również błędami połączeń półprzewodnikowych, np. dysfunkcją bramek tranzystorowych. W celu weryfikacji działania algorytmów diagnostycznych przeprowadziłem rozszerzone testy eksperymentalne, w których jednocześnie modelowałem uszkodzenie uzwojenia stojana jak i pracę falownika z otwartym tranzystorem. Analiza zmian w wartościach chwilowych prądów fazowych stojana nie daje odpowiedzi, gdyż znaczące zmiany amplitudy występują tylko przy uszkodzeniu tranzystora. Natomiast w przypadku minimalnego stopnia uszkodzenia w stojanie zmiany w amplitudach prądów są bardzo małe. W badaniach zastosowałem analizę składowych symetrycznych prądu stojana jako metodę, która umożliwi ocenę diagnostyczną rozpatrywanych uszkodzeń. Przeprowadzając szczegółową analizę zwróciłem uwagę na zmiany składowej kolejności zgodnej i przeciwniej dla rozpatrywanych osobno uszkodzeń. Znaczące zmiany, które mogą być podstawą do prowadzonej diagnostyki dotyczą tylko składowej przeciwniej prądu stojana. Następnie wykorzystując opracowany wirtualny przyrząd diagnostyczny zrealizowałem testy on-line dla obu uszkodzeń występujących jednocześnie.



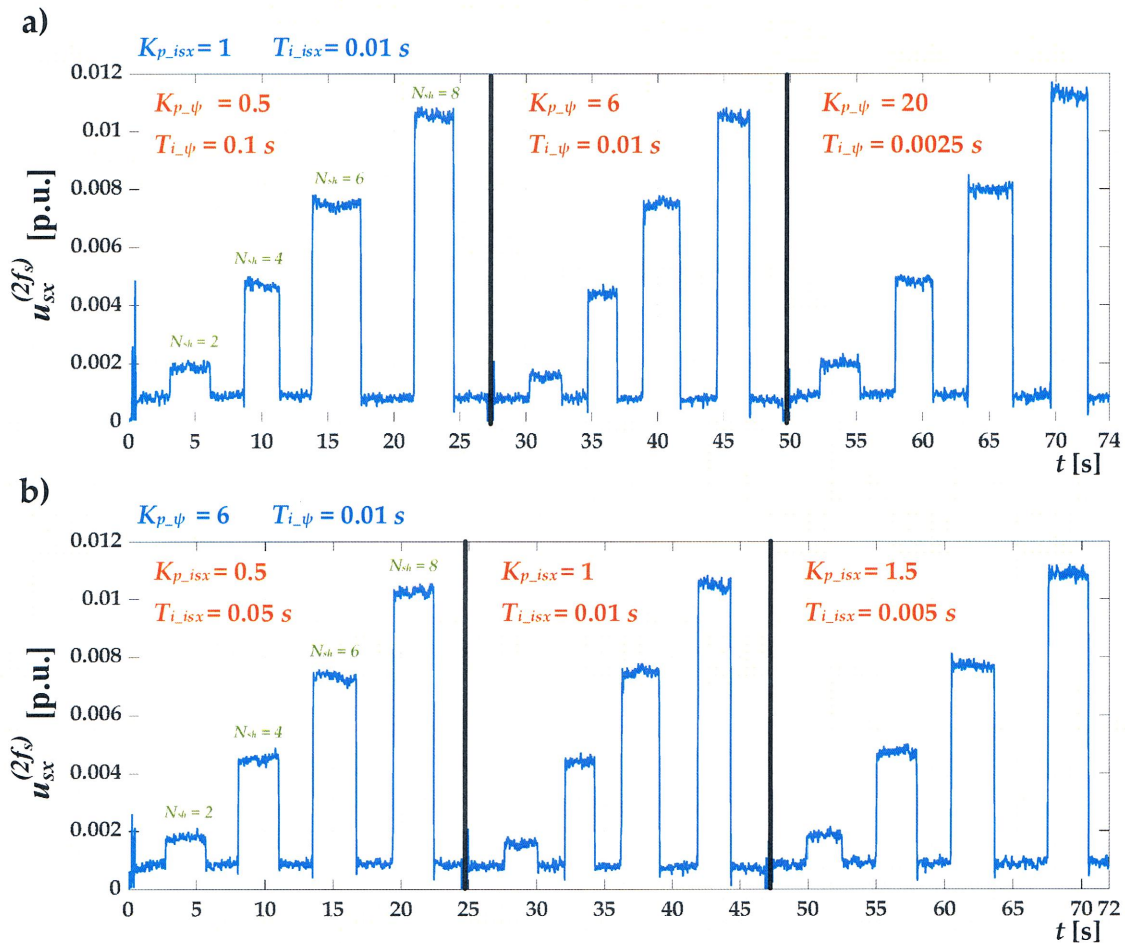
Rys. 5.11. Amplituda częstotliwości f_s składowej przeciwnej prądu stojana w trakcie pracy napędu

Badania wykazały skuteczność zastosowania amplitudy składowej kolejności przeciwnej do oceny obu uszkodzeń. Z uwagi na te same symptomy uszkodzeń dla rozpatrywanych asymetrii ważne jest określenie i porównanie ich zmian ilościowych. Diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana powoduje znacznie mniejsze zmiany wartości składowej przeciwnej prądu stojana. Wyniki porównawcze uszkodzeń przy zastosowaniu wybranej metody przestawiłem na rys. 5.11.

W badaniach przedstawionych w artykule [1] dokonałem sprawdzenia możliwości diagnostyki napędu pracującego w beczujnikowej strukturze sterowania DFOC, przy estymacji prędkości kątowej. Do szczegółowej analizy wybrano, jak w poprzednich badaniach, sygnały z wewnętrznej struktury sterowania: składową wektora prądu stojana odpowiedzialną za generowanie strumienia wirnika i_{sx} , składową wektora prądu stojana odpowiedzialną za generowanie momentu elektromagnetycznego i_{sy} oraz dwie składowe wektora napięcia u_{sx} i u_{sy} . Możliwość wykrycia zwarcia zwojowego w początkowej fazie rozpatrzyłem na podstawie zmian wartości amplitudy częstotliwości $2f_s$ w wybranych wewnętrznych sygnałach diagnostycznych. Przeprowadzone badania ponownie potwierdziły możliwość wykorzystania wirtualnych sygnałów wewnętrznych struktury sterowania do diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana, również przy pracy napędu w trybie beczujnikowym (rys. 5.12).



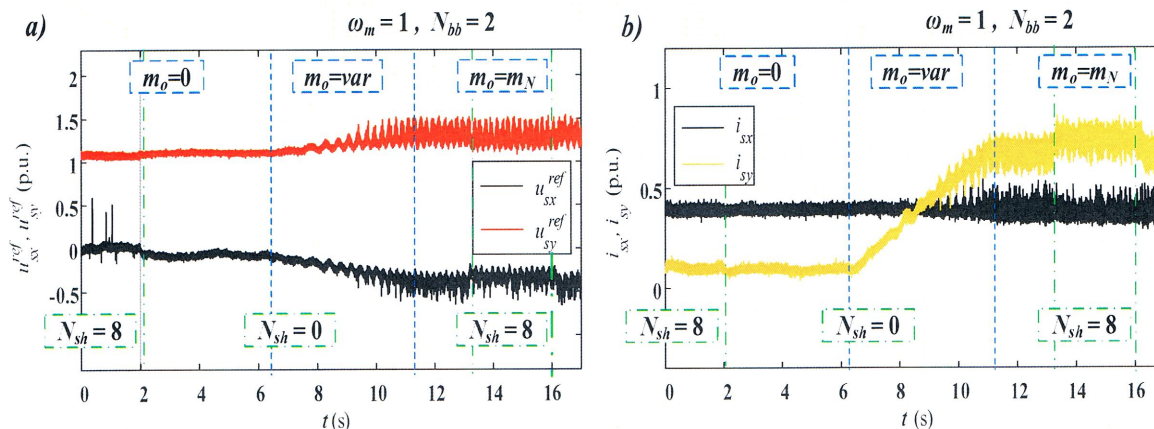
Rys. 5.12. Porównanie zmian wartości amplitudy częstotliwości $2f_s$ składowej napięcia u_{sx} dla pracy napędu z czujnikiem prędkości i w trybie beczujnikowym



Rys. 5.13. Wpływ wartości parametrów regulatora PI na amplitudy częstotliwości $2f_s$ składowej napięcia u_{sx} w przypadku zmiany parametrów: a) regulatora strumienia, b) regulatora i_{sx}

Dodatkowo przeanalizowałem wpływ: momentu obciążenia, prędkości kątowej, a także rezystancji w pętli zwarciowej oraz zmian parametrów regulatorów sygnałów na intensywność zmian symptomów uszkodzenia. Umożliwiło to dokonanie dodatkowej selekcji sygnałów diagnostycznych pod kątem ich odporności na warunki pracy napędu i zmiany parametrów struktury sterowania. Spośród badanych sygnałów składowa napięcia sterowania u_{sx} wykazała się największą odpornością na zmiany parametrów regulatorów (rys. 5.13).

W kolejnych pracach podjąłem próbę uzupełnienia opracowanego wirtualnego przyrządu diagnostycznego o możliwości diagnostyki uszkodzeń uzwojeń wirnika silnika pracującego w napędzie przekształtnikowym [3] i [5]. Założeniem wstępnym było opracowanie przyrządu diagnostycznego pracującego on-line umożliwiającego jednoczesną diagnostykę uzwojeń stojana i wirnika oraz możliwą separację symptomów przy jednoczesnym uszkodzeniu. W pierwszej kolejności przeprowadziłem badania, które miały na celu wybór odpowiednich sygnałów diagnostycznych i porównanie zakresów zmian ich wartości w przypadku modelowanych fizycznie uszkodzeń. Biorąc pod uwagę wnioski z poprzednich badań dla struktury zamkniętej DFOC, zmiany przebiegów chwilowych przy uszkodzeniach i zmianach momentu obciążenia, do szczegółowej analizy wybrałem sygnały u_{sy} oraz i_{sx} z wewnętrznej struktury sterowania napędem (rys. 5.14).

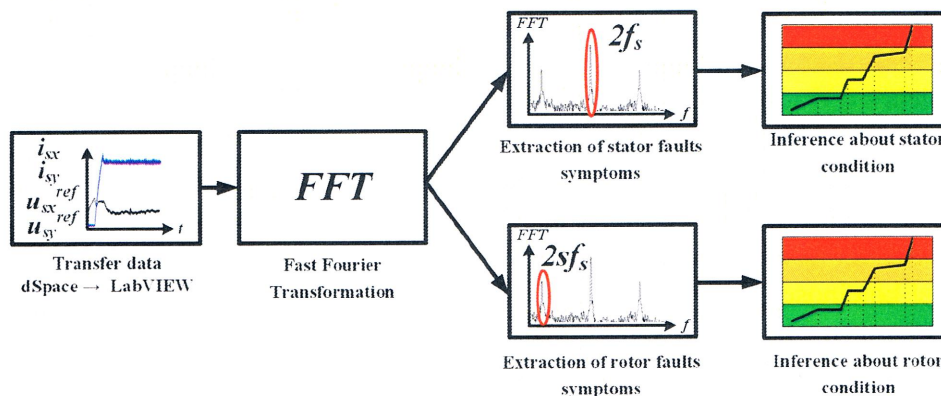


Rys. 5.14. Działanie układu sterowania DFOC silnikiem indukcyjnym dla $\omega_m=1$ i $N_{bb}=2$ w przypadku powstania uszkodzeń elektrycznych (permanente uszkodzenie 2 prętów wirnika, czasowe zwarcia 8 zwojów): a) napięcia zadane w układzie x-y, b) składowe wektora prądu stojana w układzie x-y

Na podstawie analizy widmowej wewnętrznych sygnałów jako symptomy uszkodzeń uzwojeń stojana wybrałem amplitudę częstotliwości charakterystycznej $f_{sh} = 2f_s$, natomiast jako symptom uszkodzenia wirnika - zmiany wartości amplitudy składowej tzw. poślizgowej $f_{bb}=2sf_s$.

Kolejnym etapem badań diagnostycznych było sprawdzenie poprawności monitorowania zmian wartości amplitudy charakterystycznych częstotliwości f_{sh} oraz f_{bb} przy zastosowaniu opracowanej procedury diagnostycznej (rys. 5.15).

Badania wykazały, że możliwa jest ocena stanu uzwojenia wirnika i stojana na podstawie monitorowania zmian wartości amplitud charakterystycznych składowych widma sygnałów wewnętrznych struktury sterowania. Ponadto można zauważyć, że oba uszkodzenia są możliwe do identyfikacji w sytuacji jednoczesnego wystąpienia. Opracowana przez mnie metoda diagnostyczna posiada jednak dwa ograniczenia. Diagnostyka wirnika nie jest możliwa dla momentu obciążenia bliskiego zero oraz wielkość sygnałów diagnostycznych zmniejsza się przy małych prędkościach, co może powodować utrudnienia w ocenie uszkodzenia. Referat konferencyjny [3] został pozytywnie odebrany przez komitet naukowy i został on wskazany po rozszerzeniu badań do publikacji w IEEE Transactions on Industrial Applications.



Rys. 5.15. Procedura diagnostyczna uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego

Coraz doskonalsze metody analizy sygnałów diagnostycznych dostarczają dużo danych, które wymagają nowych sposobów ich przetwarzania tak, aby proces wykrywania i oceny uszkodzeń był obiektywny i w dużym stopniu zautomatyzowany. Można to osiągnąć przez wykorzystanie możliwości tkwiących w metodach i technikach sztucznej inteligencji.

Dlatego równolegle do prac związanych z poszukiwaniem i wdrażaniem nowych metod diagnostycznych oraz analiz sygnałów, prowadziłem badania dotyczące zastosowania sztucznych sieci neuronowych, jako detektorów i klasyfikatorów elektrycznych uszkodzeń silnika indukcyjnego. Wyniki badań zostały opublikowane w publikacjach [2], [4], [9], [12]. Przedstawiono w nich zastosowanie w diagnostyce silników indukcyjnych dwóch rodzajów sieci neuronowych: sieci wielowarstwowe preceptorowe MLP (ang. Multilayer Perceptron) oraz sieci samoorganizujących Kohonena SOM (ang. Self-Organizing Map).

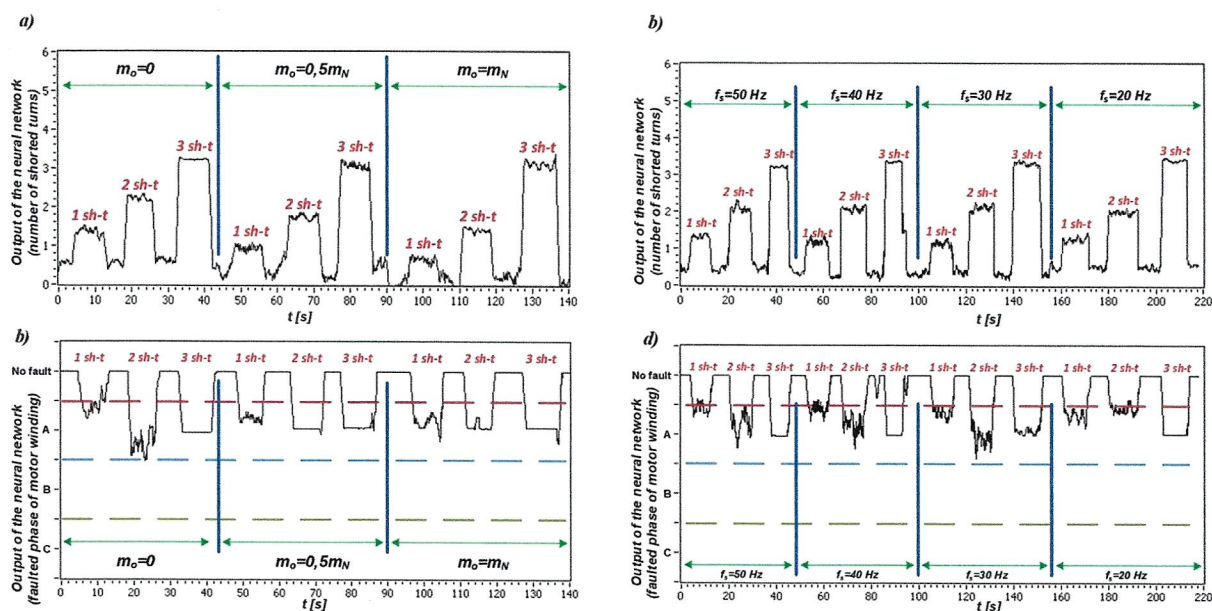
Głównym celem stosowania sztucznych sieci neuronowych jest szybka detekcja i identyfikacja uszkodzeń uzwojeń stojana i wirnika oraz ocena stopnia uszkodzenia (klasyfikacja). Detekcja uwzględniała odpowiednie wnioskowanie, tzn. wykrycie uszkodzenia, jego klasyfikację oraz lokalizację. Sieci neuronowe były uczone i wstępnie testowane poza układem napędowym – *off-line*. Do tego celu wykorzystałem środowisko MATLAB. Następnie były implementowane w całości w środowisku LabView. Dzięki realizacji wirtualnych neuronowych detektorów, działających *on-line*, rozszerzyłem możliwości funkcjonalne opracowanych systemów diagnostycznych o automatyczną ocenę stanu uzwojeń silnika indukcyjnego.

Prace badawcze związane z sieciami neuronowymi *MLP* zostały przedstawione w [9] i [12]. Dotyczyły one zastosowania sieci neuronowych do wykrywania pojedynczych zwarców zwojowych stojana silnika małej mocy zasilanego z przekształtnika częstotliwości.

Praca [12] została wyróżniona podczas konferencji IECON'13 (*Best Paper in Session Award, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*). Do oceny stopnia i lokalizacji uszkodzenia uzwojenia stojana wykorzystałem metodę opartą na analizie zmian kąta przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i prądem stojana. Podstawą diagnostyki zwarców zwojowych wykorzystującą powyższą metodę jest fakt powstania asymetrii amplitudowej oraz fazowej prądów stojana po wystąpieniu zwarcia. Ta druga wprowadza tym samym zmianę analizowanego kąta przesunięcia fazowego. Dla maszyny symetrycznej kąt przesunięcia fazowego obliczony dla każdej z faz silnika pozostaje na tym samym poziomie zależnym od obciążania silnika. Asymetria wprowadzona przez uszkodzenie powoduje niesymetryczne zmiany przesunięcia w zależności od fazy silnika, w której wystąpiło zwarcie. Praktyczną użyteczność przedstawionej metody sprawdziłem w badaniach eksperymentalnych na silniku małej mocy, pracującym w otwartej pętli sterowania. Dodatkowo sprawdziłem wpływ wartości częstotliwości napięcia zasilania oraz momentu obciążenia na przesunięcie fazowe. Wnioskowanie o stanie uzwojenia stojana, a w przypadku jego wykrycia dokładnie określenie jego stopnia oraz lokalizacji zrealizowałem z zastosowaniem sieci neuronowych typu MLP. W procesie treningu sieci neuronowej wykorzystałem algorytm Levenberga-Marquardta. Warstwa wyjściowa zawierała 2 neurony o liniowej funkcji aktywacji, które zwracały wartość określającą stopień uszkodzenia uzwojenia silnika (ilość zwartych zwojów) oraz informację, w której fazie silnika wystąpiło uszkodzenie. Projekt uczenia i testowania sieci zrealizowałem za pomocą pakietu Matlab Neural Network Toolbox.

W trakcie procesu uczenia i wstępnego testowania przebadalem sieci o różnych topologiach, zmieniając kolejno liczbę neuronów w warstwie ukrytej od kilku do kilkunastu. Biorąc przy tym po uwagę fakt zniekształconego prądu stojana i napięcia z powodu zasilania z przetwornicy częstotliwości, liczba neuronów musiała zostać znacznie zwiększona w porównaniu do zasilania sinusoidalnego z sieci. Do oceny poprawności zaproponowanych struktur sieci przyjąłem procentowy wskaźnik skuteczności. Na podstawie przeprowadzonych wielu testów wybrałem sieć o topologii {5-18-2} (5 wejść, 18 neuronów w warstwie ukrytej, 2 wyjścia), odznaczającą się największą skutecznością z 10 powtórzeń na poziomie 87%. Tak sprawdzony neuronowy detektor następnie zaimplementowałem do pracy w czasie rzeczywistym. Było to uzupełnienie przygotowanego przyrządu wirtualnego o element wnioskowania oceniający stan uzwojenia stojana. Opracowany wirtualny detektor neuronowy umożliwia wykrycie bezpośrednio 1 zwartego zwoju oraz określenie fazy silnika, w której wystąpiło uszkodzenie. Skuteczność detektora jest zachowana przy zmianach częstotliwości napięcia zasilania oraz momentu obciążenia (rys. 5.16). Opracowany system diagnostyczny realizuje pomiar, wyodrębnienie symptomów uszkodzenia uzwojenia stojana z wykorzystaniem analizy przesunięcia fazowego, a następnie detekcję i lokalizację zwarc zwojowych na wczesnym etapie powstania uszkodzenia.

W kolejnej pracy [9] zaliczonej do cyklu, zostały również przedstawione badania związane z wykrywaniem uszkodzeń stojana przy zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych. Jako metodę diagnostyczną wybrałem analizę składowych symetrycznych prądów i napięć stojana, której skuteczność została potwierdzona we wcześniejszych pracach. W trakcie badań uwzględniłem różne stopnie uszkodzenia uzwojeń stojana, zmiany momentu obciążenia oraz zmiany częstotliwości napięcia zasilającego. Silnik był zasilany z przemiennika częstotliwości i pracował przy różnych wartościach częstotliwości napięcia zasilania, co powodowało dodatkowe utrudnienie w detekcji liczby zwartych zwojów.

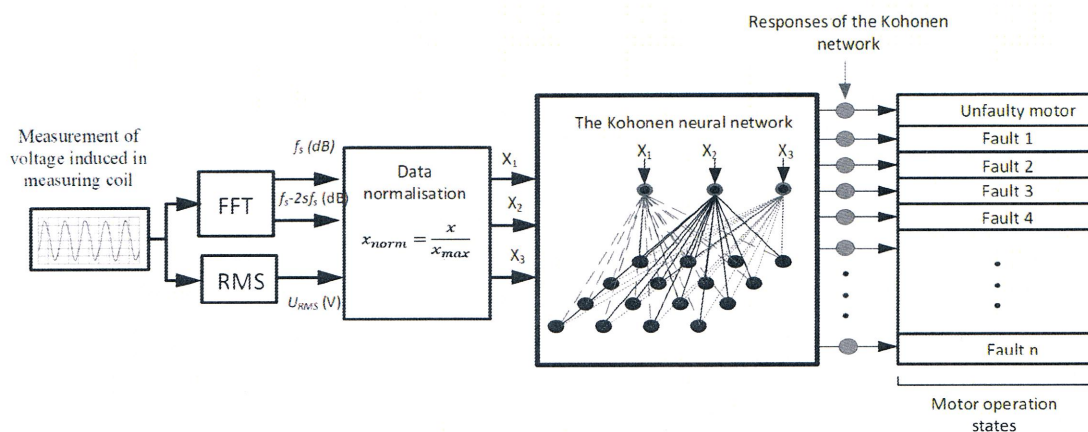


Rys. 5.16. Odpowiedź neuronowego detektora uszkodzenia stojana w pracy on-line dla różnych a) i b) momentów obciążenia; c) i d) częstotliwości napięcia zasilania, a) i c) wykrywanie poziomu uszkodzenia, b) i d) lokalizacja uszkodzenia stojana; zwarte zwoje modelowane w fazie A

Zautomatyzowana ocena stanu uzwojeń silnika była realizowana przez wirtualny detektor neuronowy oparty na wielowarstwowej sieci perceptronowej (MLP). System diagnostyczny miał za zadanie wykonać: pomiar, przetwarzanie sygnałów z wyodrębnieniem charakterystycznych dla uszkodzenia symptomów oraz dokonać identyfikacji uszkodzenia oraz określić jego stopień (liczba zwojów zwartych). Sieć neuronową zaprojektowałem w programie Matlab (trening i wstępne testy zrealizowano *off-line*). Na podstawie testów odpowiedzi sieci *off-line* wybrałem sieć o topologii {4-12-1} (4 wejścia, 12 neuronów w warstwie ukrytej, 1 wyjścia), odznaczającą się największą skutecznością z 10 powtórzeń na poziomie 92%. Następnie całość została zaimplementowana w środowisku LabView i sprawdzona *on-line*. Skuteczność wskazań opracowanego układu diagnostycznego była bardzo wysoka, również w trakcie przełączania obciążenia silnika, czy też zmiany częstotliwości napięcia zasilania. Zaproponowana realizacja znacząco wpłynęła na skrócenie czasu wykrycia uszkodzenia. *Wykonany system diagnostyczny stanowi przykład realizacji technicznej aplikacji sieci neuronowych, których właściwości umożliwiły uzyskanie praktycznie bezbłędnej (również w obecności zakłóceń) detekcji uszkodzeń.*

W pracach [2] i [4], załączonych do cyklu, zostały przedstawione wyniki badań związane z sieciami neuronowymi samoorganizującymi. Sieci Kohonena, zwane w skrócie sieciami SOM, są obecnie popularnym narzędziem stosowanym w rozwiązywaniu problemów klasyfikacji danych, grupowania, a także rozpoznawania wzorców. W artykule [4] przedstawiono wyniki badań sieci neuronowej Kohonena jako klasyfikatora uszkodzeń elektrycznych stojana i wirnika silnika indukcyjnego. Informację diagnostyczną o stanie uzwojeń pozyskiwano poprzez pomiar i analizę widmową strumienia poosiowego. Idea wykorzystania strumienia poosiowego jako sygnału diagnostycznego opiera się na założeniu, że każda maszyna elektryczna ma pewne asymetrie, magnetyczne i geometryczne, zarówno naturalne, jak i wynikające z różnego rodzaju uszkodzeń. Asymetrie te powodują pojawianie się poosiowego strumienia rozproszenia, w którym zawarte są harmoniczne związane z częstotliwościami sieci f_s oraz wirnika sf_s .

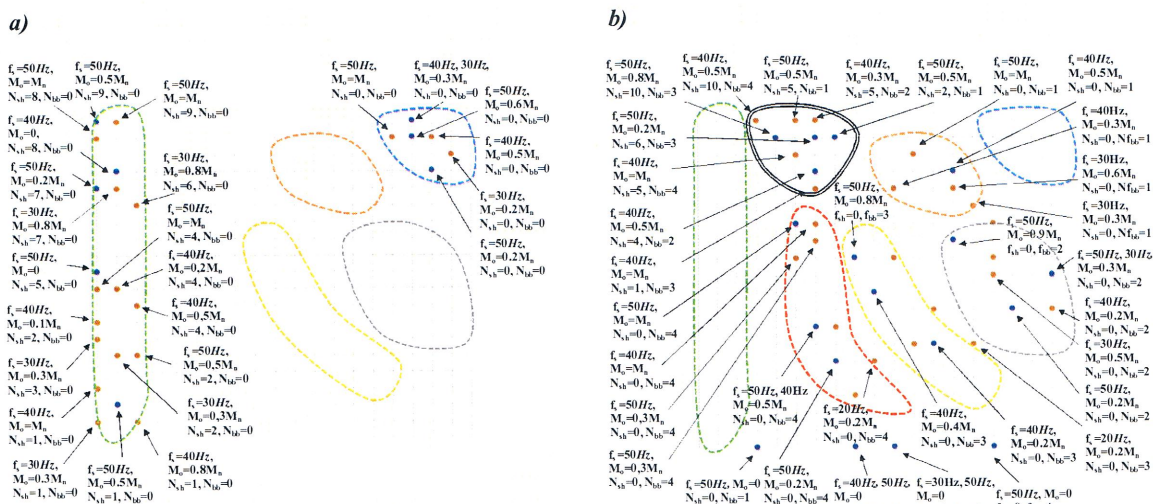
W celu wykrycia początkowej fazy zwarcia zwojowego w uzwojeniu stojana i pękniętych prętów wirnika, został opracowany wirtualny system diagnostyczny realizujący: pomiar napięcia indukowanego przez strumień poosiowy, dokładną analizę w celu wyodrębnienia symptomów uszkodzenia (charakterystycznych częstotliwości) oraz wnioskowanie o stanie obiektu. Przetwarzanie informacji diagnostycznej przedstawiłem na rys. 5.17.



Rys. 5.17. Schemat blokowy klasyfikatora sieci neuronowych elektrycznych uszkodzeń silnika indukcyjnego

Opracowany neuronowy detektor umożliwia odróżnienie uszkodzenia uzwojenia stojana i wirnika dla różnych częstotliwości napięcia zasilania i wartości momentu obciążenia. Do pomiaru strumienia poosiowego na obudowie silnika zainstalowałem cewkę pomiarową, w której indukowane było napięcie proporcjonalne do strumienia. Na podstawie szeregu badań, przy różnych stopniach uszkodzenia uzwojenia stojana jak i wirnika, wyodrębniłem te składowe częstotliwościowe, których wartość amplitudy wzrasta przy pojawieniu się uszkodzenia. Na tej podstawie opracowano wirtualny przyrząd monitorujący na bieżąco zmiany wartości amplitud charakterystycznych częstotliwości czasowych. Do oceny stanu obiektu oraz klasyfikacji uszkodzeń elektrycznych użyto sieci samoorganizującej Kohonena. Sieć była uczona i testowana przy użyciu Matlab Neural Network Toolbox. Sprawdzono skuteczność klasyfikacji sieci o 400 neuronach. Jako wektor danych wejściowych wykorzystano informację o aktualnej wartości amplitud składowych częstotliwościowych f_s , f_s-2sf_s oraz wartości RMS napięcia indukowanego w cewce pomiarowej. Tak przygotowany wektor wejściowy został wprowadzony na wejście dwuwymiarowej mapy Kohonena o rozmiarze 20x20.

Na podstawie odpowiedzi otrzymanych dla zestawu danych treningowych (przygotowanych przy napięciu zasilania $f_s = 50\text{Hz}$ i dla 5 poziomów momentu obciążenia) wyznaczono neurony na mapie Kohonena, bezpośrednio wskazujące na stopień i rodzaj uszkodzenia. Parametry sieci otrzymane podczas procesu uczenia zostały wykorzystane w detektorze neuronowym opracowanym przy użyciu oprogramowania LabView. Badania online opracowanego klasyfikatora uszkodzeń potwierdziły jego skuteczność: *aktywne neurony w przypadku zwarć zwojowych są znacząco oddzielone od neuronów odpowiedzialnych za nieuszkodzony silnik, a klasyfikacja uszkodzeń prętów wirnika jest również możliwa przy zapewnieniu obciążenia silnika* (rys. 5.18). Dodatkowo, pomimo braku wzorców w procesie uczenia została wyznaczona nowa grupa aktywowanych neuronów na mapie Kohonena dla jednoczesnej awarii uzwojenia stojana i wirnika (linia podwójna na rys. 5.18). Tak opracowany klasyfikator neuronowy jest pomocnym narzędziem służącym do wstępnej oceny kategorii i zakresu uszkodzenia. Może być również używany jako neuronowy detektor uszkodzeń, który dostarcza informacji nie tylko o typie uszkodzenia, ale także o jego poziomie.



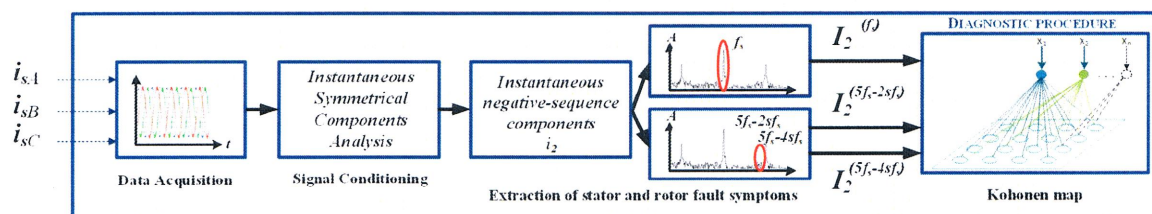
Rys. 5.18. Odpowiedź sieci Kohonena (20x20) dla różnych danych testowych (podczas pracy on-line detektora) dla: a) silnika nieuszkodzonego i z uszkodzonym uzwojeniem stojana b) uszkodzonym uzwojeniem wirnika i uszkodzeń mieszanych

Handwritten signature

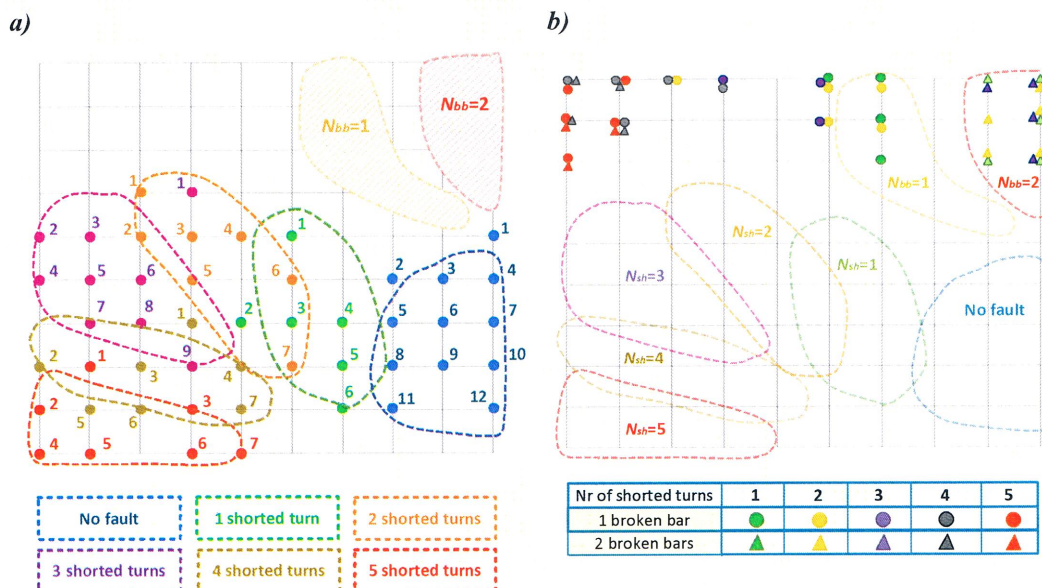
Artykuł [2], zaliczony do cyklu publikacji, stanowi kontynuację prac związanych z realizacją wirtualnych neuronowych klasyfikatorów uszkodzeń, przy wykorzystaniu informacji diagnostycznej otrzymywanej z analizy sygnałów dostępnych pomiarowo na obiekcie. Dotychczasowe doświadczenia, związane z badaniami diagnostycznymi, wskazują na dużą skuteczność analizy składowych symetrycznych prądu stojana w wykrywaniu uszkodzeń silników indukcyjnych. Celem analizowanej publikacji było sprawdzenie czy potwierdzi się to w napędzie przekształtnikowym. Do identyfikacji elektrycznych uszkodzeń oraz oceny ich stanu zastosowano ponownie sieci samoorganizujące Kohonena. We wstępnych badaniach eksperymentalnych wyznaczono charakterystyczne dla uszkodzeń uzwojenia stojana i wirnika symptomy, które następnie posłużyły jako wektor danych wejściowych (wybrane amplitudy charakterystycznych częstotliwości otrzymane z analizy widmowej chwilowej składowej przeciwnej prądu stojana). Procedurę proponowanej diagnostyki przedstawiłem na rys. 5.19.

W doborze struktury sieci neuronowej wzięto pod uwagę różny rozmiar sieci, zasięg sąsiedztwa oraz liczbę epok uczących. Wyznaczenie skupień jednostek o podobnych cechach pozwala na wyraźne rozgraniczenie różnych podzbiorów całego zbioru danych, co stanowi odseparowanie obszarów mapy charakterystycznych dla poszczególnych uszkodzeń. Struktura sieci, liczba neuronów, zasięg sąsiedztwa w sposób bezpośredni wpływa na zdolność wyróżniania skupień. Na tej podstawie wybrano dwuwymiarową mapę Kohonena o rozmiarze 10x10. Odpowiedzi sieci na wektor treningowy pozwoliła na wyznaczenie strefy map Kohonena wskazujące stan techniczny obwodów elektrycznych testowanego silnika. Następnie przeprowadzono weryfikację doświadczalną uzyskanych sieci pod kątem klasyfikacji uszkodzeń uzwojenia wirnika i stojana oraz uszkodzeń mieszanych. Analiza otrzymanych map Kohonena dała możliwość oceny kategorii i zakresu uszkodzeń (rys. 5.20). Strefy map wskazujące na specyficzne uszkodzenia maszyny są wyraźnie identyfikowane i wyraźnie oddzielone od strefy nieuszkodzonych uzwojeń silnika. *Fakt ten jest niewątpliwą zaletą korzystania z samoorganizujących sieci Kohonena podczas wstępnej oceny stanu silnika.*

Analizując uzyskane mapy, zaobserwowano stopniowe dystansowanie stref charakterystycznych dla omawianych wad uzwojeń ze względu na wzrost stopnia uszkodzenia. Dodatkowo, pomimo braku wzorców w procesie uczenia została wyznaczona strefa aktywowanych neuronów na mapie Kohonena dla uszkodzeń mieszanych, która nie należy do żadnej z wcześniej omówionych. Konwencjonalne metody wykrywania uszkodzeń wirnika nie pozwalają na diagnostykę w przypadku braku obciążenia. Ze względu na brak możliwości wyodrębnienia składowych charakterystycznych dla uszkodzenia. Również i w tym przypadku opracowany klasyfikator dostarczył informacji na temat nietypowej sytuacji dla testowanej maszyny, co pozwala na klasyfikację uszkodzeń w przypadku nieobciążonego silnika. Fakt ten może być stosowany w procedurze diagnostycznej jako rodzaj sygnału alarmowego wskazującego stan silnika.



Rys. 5.19. Procedura diagnostyki uzwojeń stojana i wirnika przy użyciu metody SCA i sieci Kohonena (SOM)



Rys. 5.20. Klasyfikacja awarii silnika indukcyjnego: a) uszkodzenia uzwojeń stojana: linie przerywane - kategorie uszkodzeń IM zaangażowanych w klasyfikację, obszary zakreskowane - kategorie uszkodzeń IM nieobjęte klasyfikacją; b) uszkodzenia mieszane: linie przerywane - kategorie uszkodzeń IM nieobjęte klasyfikacją; N_{sh} - liczba zwartych zwojów w uzwojeniu stojana, N_{bb} – liczba uszkodzonych prętów

Na podstawie przeprowadzonych testów wyznaczono skuteczność wykrywania i klasyfikacji uszkodzeń. Skuteczność detekcji indywidualnych uszkodzeń oszacowano na poziomie około 90 %, mieszanych 74%, natomiast ich odpowiednią klasyfikację na 74% dla uszkodzeń stojana oraz 93% dla uszkodzeń wirnika.

Pomimo małej mocy badanego silnika i stosunkowo słabego wpływu analizowanych początkowych uszkodzeń elektrycznych na wielkości wybranych symptomów uszkodzeń, udowodniłem, że możliwe jest sklasyfikowanie i wykrycie tych uszkodzeń na początkowym etapie i zaprojektowanie gotowego do użycia systemu diagnostycznego przy użyciu narzędzi sztucznej inteligencji, które mogą pomóc użytkownikom końcowym w monitorowaniu i diagnostyce napędów przekształtnikowych.

Podsumowując można stwierdzić, że metody i techniki sztucznych sieci neuronowych umożliwiają w znacznym stopniu zobiektywizowanie procesu klasyfikacji i oceny uszkodzeń.

D. Określenie wpływu autora w rozwój dyscypliny

Przedstawiony cykl publikacji przedstawia wyniki badań dotyczących nowych metod diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana (zwarcia zwojowe) i wirnika (pęknięte pręty klatki) niskonapięciowych silników indukcyjnych, pracujących w napędzie przekształtnikowym w układzie sterowania skalarnego jak i wektorowego. Z uwagi na coraz częstsze stosowanie w napędach przemysłowych metod sterowania wektorowego, większy nacisk położyłem na poszukiwanie skutecznych metod diagnostyki uszkodzeń elektrycznych w napędach o zamkniętej strukturze sterowania (DFOC i DTC).

Jak wykazały badania i własne doświadczenia, skuteczność zastosowanych metod diagnostycznych silnie zależy od aktualnej wartości prędkości obrotowej oraz momentu obciążenia silnika. Dlatego konieczna była wcześniejsza weryfikacja symulacyjna i eksperymentalna proponowanych metod diagnostycznych oraz opracowanie takich

rozwiązań, w których wpływ zmiennych warunków pracy maszyny na proces wykrywania uszkodzeń byłby znikomy. Wszystkie z zaproponowanych przeze mnie metod i oryginalnych rozwiązań systemów diagnostycznych (w zakresie sprzętu i oprogramowania) zostały z powodzeniem przetestowane w warunkach laboratoryjnych na niskonapięciowych silnikach indukcyjnych. Umożliwiło to dokonanie oceny praktycznej przydatności proponowanych rozwiązań oraz wykazanie możliwości ich wdrażania w systemach przemysłowych.

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

- opracowanie skutecznych metod diagnostyki uzwojeń stojana silnika indukcyjnego pracującego w przekształtnikowym układzie napędowym, przy wykorzystaniu sygnałów dostępnych pomiarowo i obliczanych w wewnętrznej strukturze układu sterowania,
- opracowanie skutecznych metod diagnostyki uzwojeń wirnika silnika indukcyjnego pracującego w przekształtnikowym układzie napędowym, przy wykorzystaniu sygnałów dostępnych pomiarowo i obliczanych w wewnętrznej strukturze układu sterowania,
- opracowanie i weryfikacja eksperymentalna metod monitorowania i diagnostyki uzwojeń silnika indukcyjnego dla układów wektorowego sterowania napędem przekształtnikowym,
- opracowanie i weryfikacja metod jednoczesnej diagnostyki uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego pracującego w przekształtnikowym układzie napędowym,
- analiza możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych do klasyfikacji i oceny stopnia uszkodzenia uzwojeń elektrycznych silnika indukcyjnego,
- opracowanie i weryfikacja różnych struktur neuronowych detektorów uszkodzeń uzwojeń stojana i wirnika, przystosowanych do pracy w różnych warunkach zasilania i obciążenia silnika,
- opracowanie i realizacja prototypowej wersji neuronowego detektora uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego,
- opracowanie oprogramowania oraz aplikacji czasu rzeczywistego umożliwiającej monitorowanie i diagnostykę przekształtnikowych układów napędowych z silnikiem indukcyjnym.

Przedstawione zagadnienia nie wyczerpują w pełni tematyki związanej z diagnostyką uszkodzeń elektrycznych w napędach przekształtnikowych. Wiele z nich może być przedmiotem dalszych prac badawczych. Prowadzę lub będę w przyszłości prowadzić badania dotyczące między innymi:

- Poszukiwania nowych metod diagnostycznych do wykrywania uszkodzeń elektrycznych silników indukcyjnych oraz silników synchronicznych z magnesami trwałymi, a w szczególności pracujących w zamkniętych strukturach sterowania. Powyższe badania będą prowadzone między innymi w ramach projektu OPUS, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, w ramach którego jestem jednym z głównych wykonawców.

- Opracowania nowych metod oceny stanu napędów elektrycznych przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji, a w szczególności z zastosowaniem hybrydowych sieci neuronowych oraz metod głębokiego uczenia. Prace będą ukierunkowane na projektowanie neuronowych detektorów uszkodzeń oraz ich praktyczną realizację.
- Opracowania nowych metod diagnostyki i kompensacji uszkodzeń elektrycznych wykorzystujących estymatory zmiennych stanu i parametrów oraz ich implementacją w przemysłowych układach przekształtnikowych.

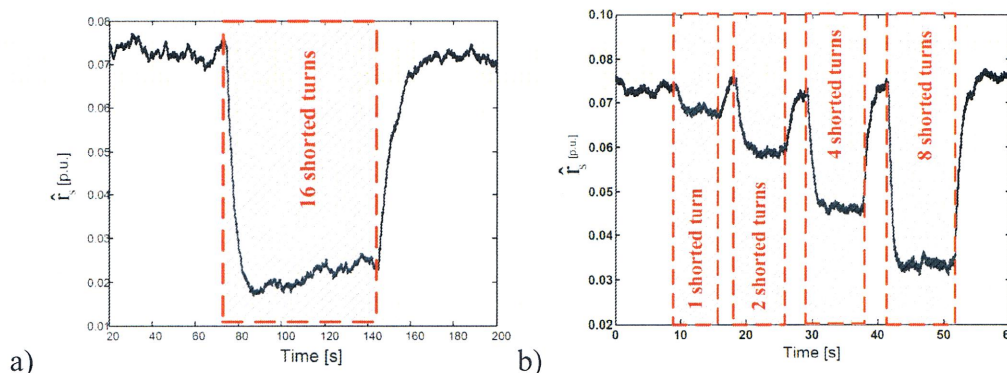
6. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Dominujący zakres realizowanych przeze mnie prac naukowo-badawczych, prowadzonych po uzyskaniu stopnia doktora dotyczył diagnostyki elektrycznych uszkodzeń silników indukcyjnych w przekształtnikowym układzie napędowym oraz zastosowania modeli sztucznych sieci neuronowych jako układów wnioskujących nad stanem silnika. Szczegóły dotyczące tej tematyki przedstawiłem w poprzednim rozdziale niniejszego opracowania. Poza wymienionymi badaniami, moja uwaga była skupiona również na innych zagadnieniach, w tym zastosowaniu estymacji zmiennych stanu do diagnostyki i kompensacji uszkodzeń, wykorzystania analiz wyższych rzędów do diagnostyki zwarć zwojowych, budowy niezależnych systemów diagnostycznych oraz częściowo na diagnostyce uszkodzeń mechanicznych. Ponieważ pozostałe osiągnięcia nie zostały uwzględnione w cyklu publikacji powiązanych tematycznie, stanowiących podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego i nie zostały załączone do dokumentacji, przedstawiłem również wybrane wyniki badań w tej tematyce.

6.1. Diagnostyka uszkodzeń elektrycznych wykorzystująca estymację zmiennych stanu oraz parametrów.

Równoległe z opracowywaniem skutecznych metod diagnostycznych bazujących na analizie sygnałów diagnostycznych dostępnych pomiarowo, uczestniczyłem w realizacji badań charakteryzujących się innym podejściem do diagnostyki napędów przekształtnikowych. Przede wszystkim dotyczyły one diagnostyki opartej na modelach matematycznych uszkodzonych silników oraz estymatorach zmiennych stanu i parametrów, wykorzystywanych do wyodrębniania cech umożliwiających identyfikację i określenie stopnia uszkodzenia. Zastosowanie takiego podejścia do diagnostyki silników opiera się na fakcie, że wystąpienie uszkodzenia powoduje zmianę wartości parametrów zastępczych silnika. Dlatego jeżeli istnieje możliwość realizacji estymacji parametrów i zmiennych stanu silnika w czasie pracy napędu, to pojawiające się zmiany ich wartości, w stosunku do wartości w silniku nieuszkodzonym, można traktować jako symptomy uszkodzeń. W prowadzonych badaniach skupiłem uwagę na podejściu, w którym estymuje się parametry schematu zastępczego silnika: rezystancję uzwojeń stojana i wirnika [13-15].

W pracy [13] wykorzystano modele matematyczne estymatorów (rozszerzony obserwator Luenbergera, rozszerzony filtr Kalmana) do diagnostyki uszkodzeń uzwojeń silnika indukcyjnego, pracującego w strukturze wektorowego sterownia DFOC. W trakcie badań eksperymentalnych oba estymatory pracowały niezależnie od układu sterowania prędkością i za zadanie miały jedynie estymację rezystancji uzwojeń wirnika oraz stojana, których wartości zmieniała się wraz ze stopniem uszkodzenia. Przykładowe wyniki badań dla estymacji rezystancji stojana przedstawiono na rys 6.1.



Rys. 6.1. Przebiegi estymowanej rezystancji stojana przy zwarcu zwojów wyznaczone przez a) filtr Kalmana, b) obserwator Luenbergera

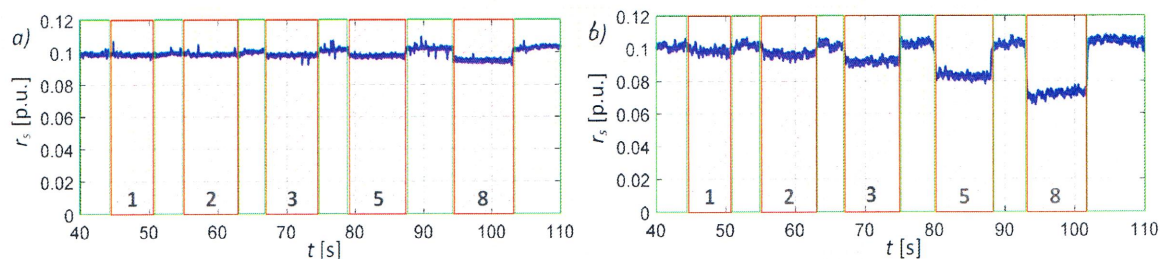
Jak pokazują przedstawione przykładowe wyniki badań, estymacja rezystancji stojana umożliwia wykrycie początkowego uszkodzenia uzwojenia stojana. Ze względu na złożoność obliczeniową estymatora z filtrem Kalmana, wymagany jest stosunkowo długi czas obliczeń, co może wpłynąć negatywnie na celowość tak prowadzonej diagnostyki. W podobny sposób można wykorzystać informację o aktualnej wartości estymowanej na bieżąco rezystancji zastępczej wirnika.

O ile w przypadku uszkodzeń wirnika czas obliczeń aktualnej wartości rezystancji zastępczej nie jest wartością krytyczną to przy uszkodzeniu uzwojeń stojana należy dążyć do minimalizacji czasu trwania obliczeń. Dlatego też w pracy [14] została podjęta próba wykorzystania innych estymatorów do diagnostyki uzwojeń stojana. Dla których nie są wymagane skomplikowane i długotrwałe obliczenia numeryczne. W tym celu rozważono proste estymatory. Pierwszy opierający się na prostym modelu napięciowym (VM) oraz drugi - na modelu adaptacyjnym systemu odniesienia (MRAS).

Oba estymatory zostały przetestowane w strukturze DFOC w różnych warunkach pracy, w tym ze zwarcie w obwodzie stojana. Przykładowe wyniki estymowanej rezystancji podczas zwarcia w uzwojeniu stojana przedstawiono na rys. 6.2.

Zadawalające wyniki uzyskano dla estymatora MRAS, ponieważ umożliwiają wykrycie zmian rezystancji na wczesnym etapie uszkodzenia (zwarłe 1-2 zwoje), w przeciwieństwie do estymatora VM, gdzie zmiany rezystancji nastąpiły dopiero przy zwarcu 3-5 zwojów. *Estymatory rezystancji stojana oparte na prostych modelach można stosunkowo łatwo zaimplementować w systemie sterowania, co jest główną zaletą takiego podejścia.*

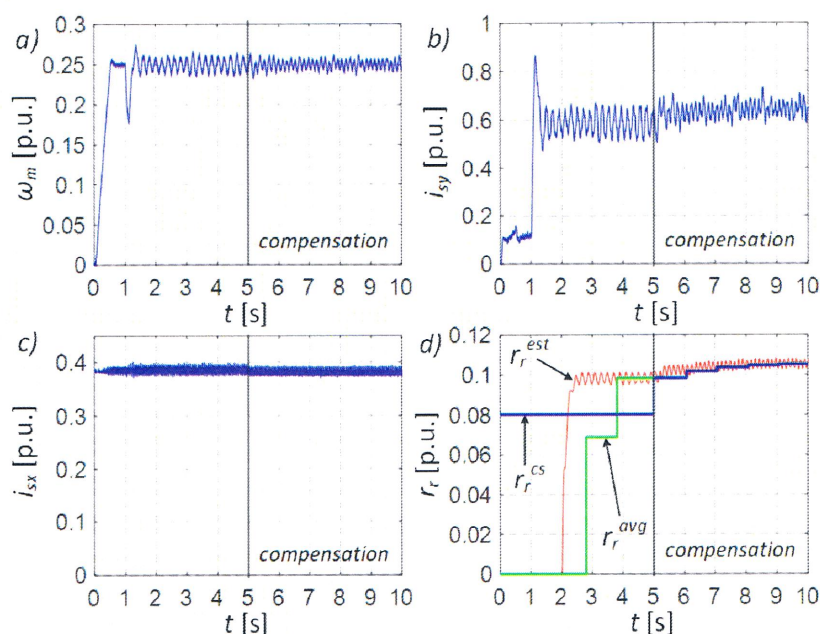
Zamiana parametrów schematu zastępczego, w tym rezystancji stojana, czy też wirnika znacząco wpływa na pracę napędu przekształtnikowego. Powoduje niewłaściwą wartość estymowanego strumienia stojana lub wirnika, co prowadzi do powstania zakłóceń działania całej struktury sterowania. Niekontrolowane zwiększenie stopnia uszkodzenia, w czasie gdy system sterujący nie podejmuje właściwych działań spowoduje niestabilną pracę układu napędowego. Dlatego oprócz estymacji rezystancji do celów diagnostyki można również przeprowadzić zmianę na aktualną wartość rezystancji w estymatorze strumienia. Tym samym dokonać częściowej kompensacji wpływu uszkodzenia na pracę napędu. Jak przedstawiono w [15] (rys. 6.3), wprowadzenie estymowanej rezystancji wirnika do układu sterowania poprawia pracę napędu, nawet w przypadku wystąpienia uszkodzeń wirnika. Można zaobserwować, że wartość rezystancji wirnika zwiększona z powodu przerwanych prętów powoduje pojawienie się dużych oscylacji w analizowanych zmiennych stanu silnika indukcyjnego.



Rys. 6.2. Przebiegi estymowanej rezystancji stojana przy zwarciu zwojów wyznaczone przez
a) estymator VM, b) estymator MRAS

Wprowadzenie uaktualnionej wartości rezystancji do estymatora strumienia wirnika powoduje kompensację uszkodzenia, tym samym zmniejsza oscylacje przebiegów. Możliwe jest więc skompensowanie uszkodzenia wirnika, ale tylko w ograniczonym zakresie, ponieważ nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie oscylacji sygnałów. Nawet niewielka kompensacja uszkodzenia daje możliwość na podjęcie stosowanych działań w celu zatrzymania uszkodzonej maszyny w sposób kontrolowany.

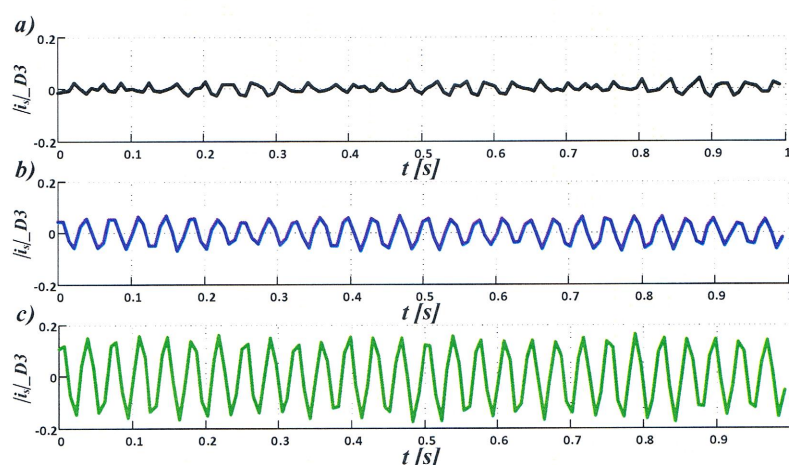
- [13] Czesław Kowalski, Robert Wierzbicki, Marcin Wolkiewicz, *Stator and rotor faults monitoring of the inverter-fed induction motor drive using state estimators*. *Automatika*. 2013, vol. 54, nr 3, s. 348-355.
- [14] Szymon Bednarz, Mateusz Dybkowski, Marcin Wolkiewicz, *Identification of the stator faults in the induction motor drives using parameter estimator*. *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Budapeszt, Węgry, 26-30 września 2018, s. 690-695.
- [15] Szymon A. Bednarz, Mateusz Dybkowski, Marcin Wolkiewicz, *Compensation of the rotor faults in the vector controlled induction motor drive using parameter estimator*. *54th International Symposium on Electrical Machines, ISEM 2018*, Andrychów, Polska, 10-13 czerwca 2018, s. 1-6.



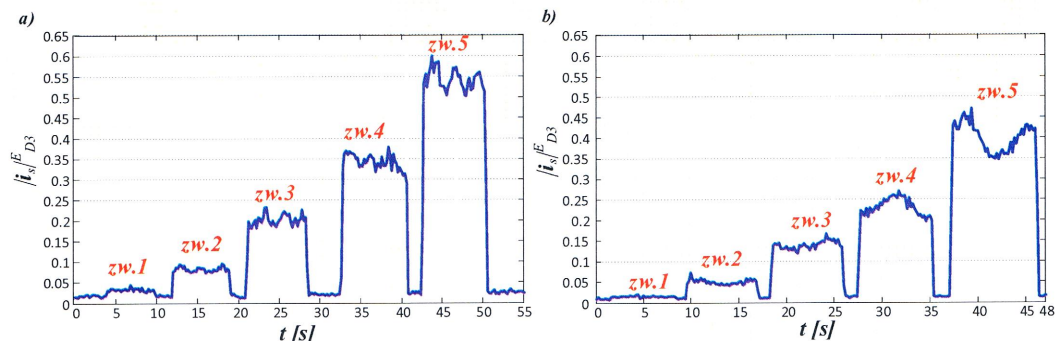
Rys. 6.3. Przebiegi a) b) c) wybranych zmiennych stanu silnika indukcyjnego, d) rezystancji wirnika podczas kompensacji zmiany rezystancji wirnika przy 3 pękniętych prętach

6.2. Diagnostyka uszkodzeń wykorzystująca analizy wyższych rzędów

Dotychczasowe badania dotyczyły klasycznych metod analizy sygnałów dostępnych bezpośrednio na obiekcie (prąd stojana, napięcie zasilania) do diagnostyki uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego. Badania te wykazały możliwość wykrycia początkowej fazy uszkodzenia, ale tylko w przypadku pracy ustalonej napędu. Niestacjonarny charakter sygnałów, a także szybkozmienna praca napędów powoduje, że metody klasyczne stają się niewystarczające we współczesnych systemach pomiarowo- diagnostycznych. Zachodzi więc potrzeba sięgnięcia po bardziej złożone analizy i transformaty, które można zastosować do analizy sygnałów niestacjonarnych i szybkozmiennych w czasie. W dobie wysoce rozwiniętej technologii mikroprocesorowej rozszerzone są możliwości obliczenia złożonych transformat widmowych i statystycznych. Mowa tutaj m.in. o analizie falkowej i analizie bispektrum. Tematyka wykorzystania dyskretnej analizy falkowej (DWT) do diagnostyki zwarć zwojowych została podjęta przeze mnie w [16] i [17]. DWT pozwala na rozdział sygnału przez zastosowanie wielokrotnej filtracji, odpowiednio filtrem górno- i dolnoprzepustowym oraz przepróbowaniu sygnału poprzez wybór próbek tylko parzystych. Transformata falkowa poprzez rozkład sygnału w dziedzinie czasu na składniki o różnych oknach czasowych i różnych pasmach częstotliwości, pozwala na wyodrębnienie i śledzenie w czasie informacji zawartej w danym paśmie częstotliwościowym sygnału. W przeprowadzonych badaniach w [18] sprawdzono możliwość rozkładu sygnału modułu wektora przestrzennego prądu stojana i na podstawie wybranego pasma dokonania oceny stanu uzwojenia stojana. Opracowana metoda diagnostyki sprawdziła poprawność wykrywania uszkodzeń przy analizie detalu dla trzeciego poziomu dekompozycji sygnału, a więc dla pasma częstotliwości w zakresie 64-128Hz. Na rys. 6.4 przedstawiono zamiany detalu trzeciego poziomu dekompozycji sygnału modułu wektora przestrzennego prądu stojana dla różnego stopnia uszkodzenia silnika nieobciążonego, potwierdzające powyższe wnioski. Dodatkowo wyznaczono współczynnik zmian energii sygnału dla wybranego poziomu filtracji, który był miarodajnym wskaźnikiem uszkodzenia i umożliwił określenie stanu zwojenia co 0,05 sekundy. Na rys. 6.5 przedstawiono wyniki odpowiedzi detektora uszkodzeń bazującego na powyższych analizach prądu stojana, przy rejestracji sygnału 0,2s. *Zastosowanie analizy falkowej i dekompozycja sygnału do odpowiedniego poziomu znacznie poprawia dokładność oceny stanu uzwojenia.*

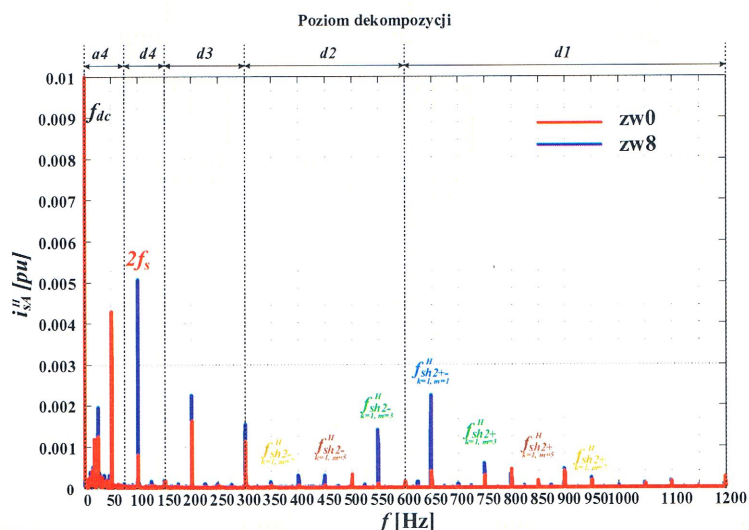


Rys. 6.4. Detal dla trzeciego poziomu dekompozycji sygnału modułu wektora przestrzennego prądu stojana $|i_s/D_3|$ dla: a) silnika nieuszkodzonego, b) zwarcia 5 zwojów, c) zwarcia 10 zwojów

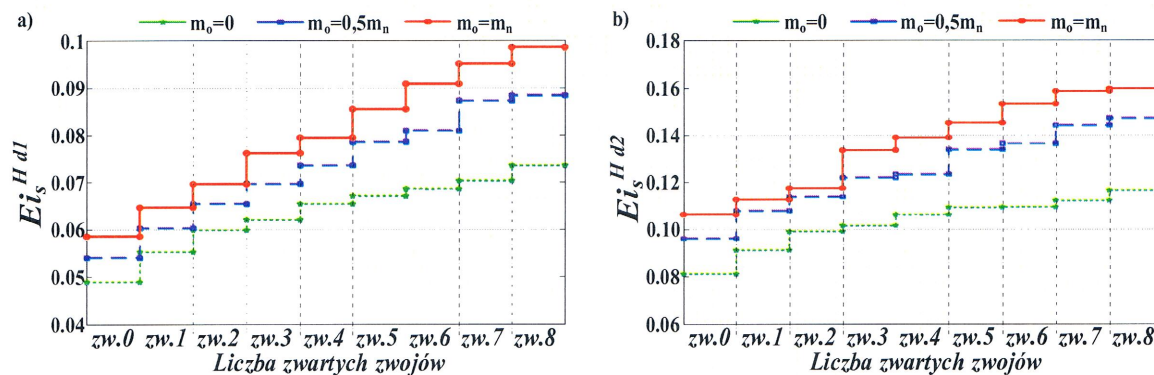


Rys. 6.5. Wynik działania detektora pracującego on-line przy stopniowym zwiększaniu stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana dla a) silnika nieobciążonego, b) silnika obciążonego znamionowo

Podobne podejście zastosowałem w pracy [17], w której opracowałem aplikację zawierającą algorytmy: akwizycji danych, transformaty Hilberta do wyznaczenia obwiedni sygnału oraz transformaty falkowej sygnału do wyodrębnienia symptomów uszkodzenia uzwojenia stojana. Badania eksperymentalne zrealizowałem dla silnika indukcyjnego małej mocy zasilanego z przemiennika częstotliwości w otwartej pętli sterowania (sterowanie skalarnie $U/f = \text{const}$). Środowisko LabView posłużyło do zaprojektowania oraz przetestowania aplikacji przyrządu pomiarowo - diagnostycznego. Do wyodrębnienia charakterystycznych dla uszkodzenia stojana symptomów wykorzystano dyskretną transformatę falkową oraz obliczony na jej podstawie współczynnik zmian energii sygnału dla wybranych poziomów dekompozycji. Dekompozycje sygnału przeprowadzono do 4 poziomu uzyskując pasma częstotliwościowe w zakresie 0-1200Hz. Przykład widma analizowanego sygnału dla silnika nieuszkodzonego i ze zwarcie 8 zwojów wraz z podziałem pasmowym dekompozycji przedstawiono na rys. 6.6. Najlepsze zmiany wyznaczonego współczynnika z punktu monitorowania uzwojeń stojana zaobserwowano dla energii dla detalu $Eis^{H d1}$ oraz $Eis^{H d2}$ wyznaczonych dla poziomu 1 (pasmo $f = 600 - 1200\text{Hz}$) oraz poziomu 2 (pasmo $f = 300 - 600\text{Hz}$). Można zauważyć praktycznie liniowy wzrost wartości $Eis^{H d1}$ oraz $Eis^{H d2}$ wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana (rys. 6.7). *Zmiany wartości współczynnika zmian energii dla obwiedni prądu stojana dla poszczególnych poziomów dekompozycji okazały się bardzo dobrym kryterium oceny stanu uzwojenia stojana.*



Rys. 6.6. Widmo obwiedni prądu stojana silnika nieuszkodzonego i ze zwarcie 8 zwojów



Rys. 6.7. Zależność współczynnika zmian energii obwiedni prądu stojana w zależności od liczby zwartych zwojów w fazie A oraz momentu obciążenia dla a) 1 poziomu dekompozycji (pasmo $f=600-1200\text{Hz}$), b) 2 poziomu dekompozycji (pasmo $f=300-600\text{Hz}$)

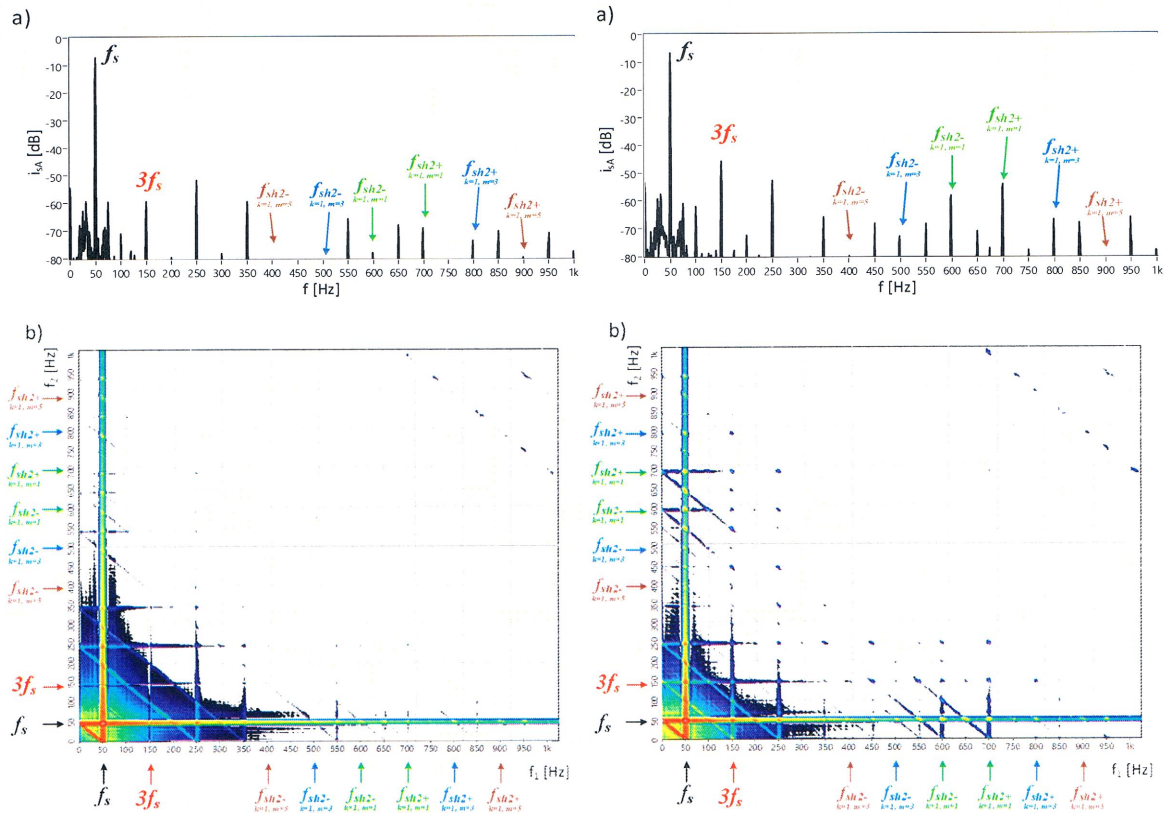
Głównym ograniczeniem w stosowaniu zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów do diagnostyki uszkodzeń elektrycznych było niewątpliwie zapotrzebowanie na dużą moc obliczeniową tych transform. Obecnie dostępny sprzęt komputerowy umożliwia z powodzeniem zastosowanie analiz wyższych rzędów w systemach monitorowania i diagnostyki uszkodzeń. W raporcie zostały przedstawione przykładowe wyniki badań eksperymentalnych nad zastosowanie analizy bispektralnej prądu stojana w diagnostyce uzwojeń stojana. W przypadku wystąpienia zwarcia zwojowego wzrasta amplituda częstotliwość f_s , jak również pojawiają się dodatkowe częstotliwości o znacznych amplitudach (rys. 6.8).

W mapie bispektrum można wyróżnić pewne zależności w częstotliwościach uszkodzeniowych, dla których istnieją rozwiązania analizy. Widoczne są dodatkowe linie, które przecinając się zmieniają wartości w punktach tworząc charakterystyczne punkty wzmocnień. Można je uznać za charakterystyczne symptomy powstające przy uszkodzeniu uzwojenia stojana. Wraz ze zwiększaniem stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana wzrasta wartość amplitudy istniejących symptomów, jak również uwidaczniają się kolejne tworząc charakterystyczne obszary, w których można zaobserwować wymienione punkty wzmocnień. *Bispektrum umożliwia rozkład częstotliwościowy sygnału oraz wskazanie na powstałym spectrum powiązań pomiędzy charakterystycznymi dla uszkodzeń symptomami.*

Przedstawione wyniki wskazują możliwość wykorzystanie analizy bispektrum w diagnostyce zwarć zwojowych silnika indukcyjnego, aczkolwiek analiza ta jest obciążona tymi samymi wadami co klasyczna analiza widmowa.

- [16] Marcin Wolkiewicz, *Analiza bispectrum w diagnostyce uzwojeń stojana silnika indukcyjnego*. Raporty Katedry Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. 2016, Ser. SPR nr 29.
- [17] Marcin Wolkiewicz, Czesław Kowalski, *Diagnostyka uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego z wykorzystaniem dyskretnej transformaty falkowej obwiedni prądu stojana*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2015, nr 107, s. 13-18.
- [18] Marcin Wolkiewicz, Czesław Kowalski, *Zastosowanie dyskretnej analizy falkowej do wykrywania zwarć zwojowych w silniku indukcyjnym*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2013, nr 100, s. 191-196.

Handwritten signature

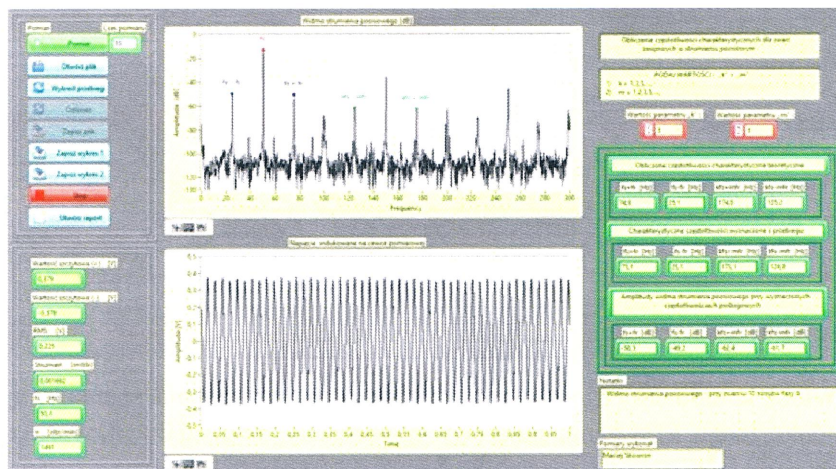


Rys. 6.8. Analiza FFT (a) i bispektrum (b) prądu stojana dla silnika nieobciążonego nieuszkodzonego i ze zwarcie 8 zwojów

6.3. Budowa wirtualnych systemów diagnostycznych wykorzystujących środowisko LabVIEW

W prowadzonych pracach badawczych jako środowisko programistyczne, w którym opracowywano wirtualne przyrządy pomiarowo - diagnostyczne, stosowano środowisko LabView. Projekty przyrządów miały za zadanie akwizycję danych pomiarowych z przetworników, wykonanie analizy czasowej i/lub częstotliwościowej sygnałów, ekstrakcję symptomów uszkodzeń jak również, w niektórych przypadkach wnioskowanie oceniające stan obiektu przy wykorzystaniu sieci neuronowych. Przykłady rozwiązań przemysłowych układów diagnostycznych zostały przedstawione m.in. na konferencjach przemysłowych [19 i 20] oraz w publikacjach naukowych [21] i [22]. Na rys. 6.9 przedstawiono panel operatora opracowanego przyrządu diagnostycznego. Opracowany program [19] i [20] posiadał funkcję wyświetlania przebiegu napięcia indukowanego w cewce oraz jego widma. Widmo napięcia uzupełnione zostało o zaznaczanie wartości amplitud przy częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzenia wraz z ich opisem. Program posiadał możliwość generowania prostych raportów z przeprowadzonego pomiaru. W [22] został opisany komputerowy system do monitorowania stanu uzwojeń silnika indukcyjnego. Opracowany system składał się z czterech podstawowych części umożliwiających: tworzenie bazy danych silników, wybór sygnałów pomiarowych oraz metod ich analizowania (analiza widmowa, analiza składowych symetrycznych, analiza przesunięć kątowych, analiza składowych głównych PCA), monitorowanie silnika – tryb on-line (program główny aplikacji) oraz analizę danych pomiarowych – tryb off-line.

Handwritten signature



Rys. 6.9. Wirtualny przyrząd diagnostyczny uszkodzeń uzwojenia stojana silnika indukcyjnego - panel operatora

Aplikacja została wykonana w środowisku LabView w taki sposób, aby można było ją uruchomić na dowolnym komputerze klasy PC. Ponadto system został wyposażony również w opcję generowania raportu z badań. Rys. 6.10 przedstawia prototypowy układ pomiarowy oraz stronę tytułową opracowanego systemu. Natomiast w [19] przedstawiono możliwości zastosowania niskobudżetowych platform sprzętowych pełniących funkcję kart pomiarowych do diagnostyki uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego. Wirtualny system diagnostyczny został wykonany w taki sposób, aby można go było uruchomić na dowolnym komputerze klasy PC. Ponadto system posiada możliwość wyboru platformy sprzętowej umożliwiającej pomiar sygnału diagnostycznego (rys. 6.11). System diagnostyczny oparty o pomiar z wykorzystaniem gotowych platform sprzętowych (w tym Arduino UNO) może stanowić alternatywę dla kosztownych kart pomiarowych.

- [19] Marcin Wolkiewicz, Maciej Skowron, *System diagnostyczny uszkodzeń elektrycznych silnika indukcyjnego wykorzystujący pomiar strumienia poosiowego przy użyciu gotowych platform sprzętowych*, *Energooszczędne Napędy Przekształtnikowe w Przemysle (ENPP)*, 2018
- [20] Marcin Wolkiewicz, Maciej Skowron, *System diagnostyczny uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego wykorzystujący pomiar strumienia poosiowego*, *Energooszczędne Napędy Przekształtnikowe w Przemysle (ENPP)*, 2017
- [21] Marcin Wolkiewicz, Maciej Skowron, *Diagnostic system for induction motor stator winding faults based on axial flux*. *Power Electronics and Drives*. 2017, vol. 2 (37), nr 2, s. 137-150
- [22] Paweł G. Ewert, Marcin Wolkiewicz, Czesław Kowalski, *Komputerowy system do monitorowania stanu uzwojeń stojana silnika indukcyjnego*. *Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe*. 2013, nr 100, s. 151-156.

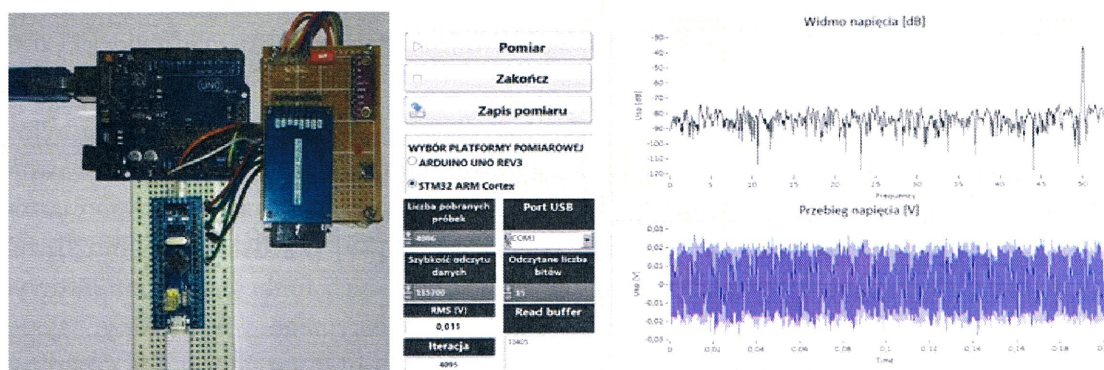
6.4. Diagnostyka uszkodzeń mechanicznych silników indukcyjnych

W większości prowadzone przeze mnie badania były skupione na diagnostyce uszkodzeń elektrycznych silników indukcyjnych klatkowych. Niemniej jednak przed, jak również po uzyskaniu stopnia doktora prowadziłem badania mające na celu opracowanie skutecznych metod wykrywania uszkodzeń mechanicznych silników indukcyjnych.

M. Wolkiewicz



Rys. 6.10. Widok komputerowego systemu do zdalnego monitorowania stanu uzwojeń silnika indukcyjnego, a) system pomiarowy, b) wirtualny przyrząd diagnostyczny



Rys. 6.11. Widok przyrządu diagnostycznego monitorowania stanu uzwojeń silnika indukcyjnego, a) układ do pomiaru napięcia wykorzystujący platformę Arduino Uno oraz STM32 ARM Cortex, b) wirtualny przyrząd diagnostyczny - panel operatora

Były to prace przede wszystkim związane z diagnostyką uszkodzeń łożysk tocznych [23], jak również ekscentryczności [24]. W trakcie tych badań po uwagę brałem metody diagnostyczne, które z powodzeniem były zastosowane w diagnostyce uzwojeń. Z uwagi na inny charakter uszkodzeń wirtualne przyrządy diagnostyczne zostały uzupełnione o możliwość monitorowania symptomów dla uszkodzeń mechanicznych (bieżące kontrolowanie wartości amplitud częstotliwości charakterystycznych dla uszkodzenia).

- [23] Paweł G. Ewert, Czesław Kowalski, Marcin Wolkiewicz, *The application of wavelet analysis and neural networks in the diagnosis of rolling bearing faults in induction motors*. Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 2b, s. 124-127.
- [24] Paweł G. Ewert, Marcin Wolkiewicz, *Przegląd metod wykrywania ekscentryczności w silniku indukcyjnym z wykorzystaniem analizy prądu stojana*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały 2015, nr 35, s. 151-160.

Marcin Wolkiewicz

Podpis wnioskodawcy