

## AUTOREFERAT

### 1. Imię i nazwisko

**Piotr Janusz Kołodziejek**

### 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

2013 – Dyplom Uniwersytetu Stanforda – staż w ramach Programu Top 500 Innovators, Stanford Center for Professional Development, CA 94305 Stanford, Stany Zjednoczone 2013

2012 – Certyfikat DTU Technical University of Denmark - projekt South Baltic Offshore Energy Region, Roskilde, Dania

**2010 Dyplom Doktora Nauk Technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Gdańsk 2010, tytuł rozprawy doktorskiej "Identyfikacja uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego z bezczujnikowym układem regulacji dla celów diagnostycznych".**

**Promotor: dr hab. inż. Elżbieta Bogalecka, prof. nadzw. PG**

**Recenzenci: prof.dr hab. inż. Czesław Kowalski, prof. dr hab. inż. Roman Śmierzchalski**

2006 Dyplom Magistra Ekonomii i Zarządzania, Politechnika Gdańska, Wydział Zarządzania i Ekonomii, specjalizacja: Zarządzanie Organizacją,

2003 Dyplom Magistra inżyniera w dyscyplinie Elektrotechnika, specjalność: Napęd Elektryczny i Energoelektronika, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki.

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

2013 stażysta, Uniwersytet Stanforda

2010-2019 adiunkt , Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego i Konwersji Energii,

2009-2010 asystent, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Automatyki,

### 4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny **elektrotechnika**<sup>1)</sup> 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*)

a) tytuł osiągnięcia naukowego,

### Cykl 13 publikacji powiązanych tematycznie:

#### „Diagnostyka asymetrii maszyn asynchronicznych w układach napędowych sterowanych skalarnie, wektorowo i bezczujnikowo”

b) 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,

1. **P. Kołodziejek**, E. Bogalecka, “Broken rotor bar impact on sensorless control of induction machine”, *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* Vol. 28 No. 3, 2009  
(IF= 0,460; pkt. wg MNiSW: 15), artykuł indeksowany w bazie *Web of Science*
2. **P. Kołodziejek**, E. Bogalecka, “Broken Rotor Symptoms in the Sensorless Control of Induction Machine” *The Fifth International Conference & Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVERMONACO 2010*, March 25-28, Monte-Carlo, Monaco 2010  
(pkt. wg MNiSW: 10), artykuł indeksowany w bazie *IEEE Xplore*
3. **P. Kołodziejek**, “Rotor Asymmetry Analysis and Diagnosis in the Closed-Loop and Sensorless Controlled Induction Motor Drive”, *Sixth International Conference & Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, Monte-Carlo, Monaco 2011*  
(pkt. wg MNiSW: 10), artykuł indeksowany w bazie *IEEE Xplore*
4. **P. Kołodziejek**, „Bezinwazyjna metoda diagnozowania uszkodzenia wirnika silnika indukcyjnego klatkowego zasilanego z przekształtnika” X Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE, Łódź 2011,
5. **P. Kołodziejek**, “Transient States of the Multiscalar Controlled Double Fed Induction Generator in the Wind Farm”, *The Tenth IEEE International Conference on Machine Learning and Applications*, Honolulu, USA 2011  
(pkt. wg MNiSW: 10), artykuł indeksowany w bazie *IEEE Xplore*
6. **P. Kołodziejek**, E. Bogalecka, “Broken Rotor Symptoms in the Sensorless Control of Induction Machine,” *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, No. 1, 2012, Emerald Group Publishing Limited,  
(IF= 0.301; pkt. wg MNiSW: 15), artykuł indeksowany w bazie *Web of Science*
7. **P. Kołodziejek**, “State observer based rotor fault diagnostic of the IM drive”, *The Seventh International Conference & Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies*, Monte-Carlo, Monaco 2012,

(pkt. wg MNiSW: 10), artykuł indeksowany w bazie *IEEE Xplore*

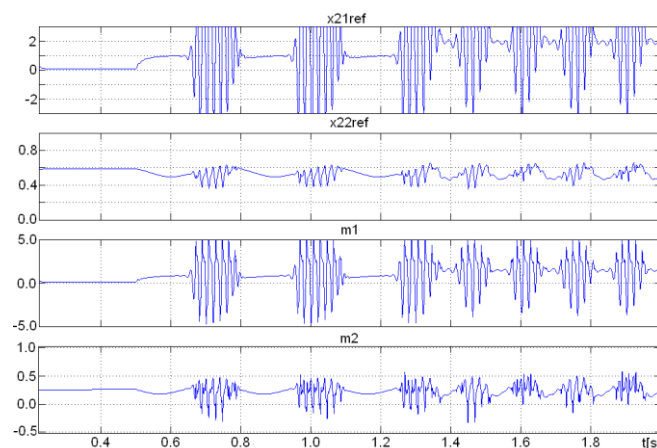
8. **P. Kołodziejek**, "Rotor Asymmetry Analysis and Diagnosis in the Closed-Loop and Sensorless Controlled Induction Motor Drive", *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* No. 1, 2013, (IF= 0.440; pkt. wg MNiSW: 15), artykuł indeksowany w bazie *Web of Science*
9. **P. Kołodziejek**, „Non-invasive method for rotor fault diagnosis in inverter fed induction motor drive”, The Eight International Conference & Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, Monte-Carlo, Monaco 2013, (pkt. wg MNiSW: 10), artykuł indeksowany w bazie *IEEE Xplore*
10. **P. Kołodziejek**, E. Bogalecka: "Metodyka diagnozowania silnika klatkowego z wykorzystaniem wirujących układów współrzędnych" (Nonstationary reference frame application for induction motor diagnostics in variable speed induction motor drive), XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'15, Łódź 2015,
11. **P. Kołodziejek**, „symptomy asymetrii wirnika w układach napędowych o zmiennej prędkości kątowej wału z silnikiem klatkowym”, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej [ISSN: 2353-1290, lista: B, punktacja MNiSW: 10.0]
12. J. Guziński, **P. Kołodziejek**, Z. Krzemiński, E. Bogalecka, P. Strankowski: Badanie niezawodności działania napędów elektrycznych// W : Bezpieczeństwo, pomiary i niezawodność w elektroenergetyce/ ed. Krzysztof Nowicki Gdańsk: INFOTECH, 2018, s.54-67 - rozdział w monografii (pkt MNiSW: 10)
13. J. Guziński, **P. Kołodziejek**, P. Strankowski, „Possibility of Fault Detection in Sensorless Electric Drives”, *AUTOMATYKA – ELEKTRYKA – ZAKŁÓCENIA* vol. 10, nr 1 (35) 2019, march, ISSN 2082-4149, (pkt. wg MNiSW: 10)

c) omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Celem naukowym prac wskazanych w cyklu publikacji powiązanych tematycznie było opracowanie metod diagnozowania uszkodzeń, w szczególności asymetrii wewnętrznej maszyn asynchronicznych, dla układów napędowych sterowanych skalarnie, wektorowo oraz bezczujnikowo. Przyjęto założenie poszukiwania metod bezinwazyjnych, które w procesach detekcji, izolacji i identyfikacji uszkodzeń bazują na przetwarzaniu sygnałów z przetworników pomiarowych wbudowanych w przekształtniku energoelektronicznym – pośrednim przemienniku częstotliwości

z falownikiem napięcia. Do diagnostyki asymetrii wykorzystano symptomy uszkodzeń identyfikowane w mechanicznych zmiennych stanu – prędkości kątowej oraz momencie elektromagnetycznym, elektromagnetycznych zmiennych stanu – prądzie stojana, strumieniu wirnika, w zmiennych układu regulacji – na wyjściach regulatorów w torach regulacji mechanicznych zmiennych stanu oraz w torze regulacji strumienia, w zmiennych multiskalarnych  $x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}$ , w mocy biernej i czynnej i w zmiennych odprężenia nieliniowego dla sterowanego obiektu - maszyny asynchronicznej, związanych z syntezą nieliniowego sterowania z wykorzystaniem linearyzacji przez sprzężenie zwrotne, w której wyznacza się nowe zmienne sterujące  $m_1$  i  $m_2$ . Przeprowadzono analizę symptomów asymetrii maszyny asynchronicznej związanej z uszkodzeniem wirnika maszyny asynchronicznej, która może wynikać również z uszkodzenia połączeń czołowych lub naturalnej asymetrii w przypadku maszyn asynchronicznych pierścieniowych.

Praca [1] **P. Kołodziejek**, E. Bogalecka, "Broken rotor bar impact on sensorless control of induction machine", COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering Vol. 28 No. 3, 2009, stanowi pierwszą publikację z listy JCR A opublikowaną po złożeniu rozprawy doktorskiej, w której zakres badań wykracza poza opisany w rozprawie. Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu nowych badań symulacyjnych względem złożonej rozprawy, tj. wpływu znacznego uszkodzenia wirnika na pracę układu bezczujnikowego sterowania. W rozprawie doktorskiej pokazano na rysunkach 47-51 wpływ uszkodzenia na mierzone i estymowane zmienne stanu maszyny asynchronicznej, tj. prędkość kątową wirnika i wektor strumienia wirnika dla wybranych struktur obserwatorów zmiennych stanu. W artykule przebadano symulacyjnie i przedstawiono wpływ uszkodzenia wirnika na zmienne sterujące w układzie regulacji, tj. wyjścia z regulatorów w torze regulacji kwadratu strumienia wirnika oraz zmienne linearyzujące przez sprzężenie zwrotne obiekt regulacji  $m_1$  i  $m_2$  jak na rys. 1.



Rys. 1. Przebiegi wielkości wyjściowych regulatorów w bezczujnikowym układzie sterowania.

W artykule przedstawiono nieopublikowane dotychczas zjawisko chwilowej utraty stabilności bezczujnikowego układu sterowania o charakterze okresowym przy znacznym zakresie uszkodzenia wirnika wynikające z założenia symetrii układu sterowania oraz obserwatora zmiennych stanu, a także z zakresu stabilności związanego z położeniem biegunów obserwatora wynikającego z doбором wzmocnień uchybów estymowanych zmiennych. Wyniki badań potwierdziły potrzebę identyfikacji charakterystyki częstotliwościowej estymatora zmiennych stanu maszyny

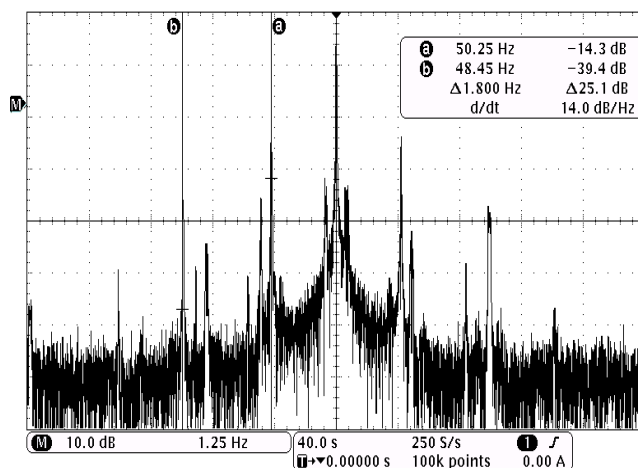
z uwzględnieniem parametrów oraz wzmocnień, które jak wynika z przeprowadzonych badań istotnie wpływają na pasmo przenoszenia oraz na kształt tej charakterystyki. Wykazano zatem, że układy sterowania maszynami, przy syntezie których przyjmuje się założenie maszyny symetrycznej mogą być niestabilne, przy czym niestabilność ta może wynikać zarówno ze zbyt niskiego zapasu stabilności estymatora zmiennych stanu jak i z doboru wzmocnień regulatorów w układzie sterowania. Symptomy uszkodzenia w takim wypadku istotnie różnią się od znanych z literatury symptomów asymetrii maszyny asynchronicznej i wymagają innej metody diagnozowania wobec braku możliwości zastosowania znanych metod. Wykazano, że są możliwe stany pracy układu napędowego, w których znane metody diagnozowania nie wykażą istniejącego uszkodzenia wirnika.

Przeprowadzenie badań symulacyjnych było możliwe dzięki samodzielnemu opracowaniu zestawu narzędzi symulacyjnych w oparciu o modele matematyczne do modelowania układów napędowych z maszynami asynchronicznymi obejmujących:

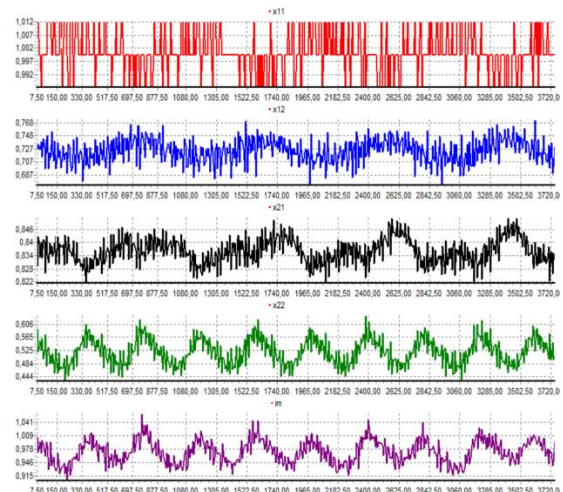
- wektorowe, w tym multiskalarne modele maszyn asynchronicznych klatkowych i pierścieniowych dla wszystkich kombinacji wybranych zmiennych stanu, względem których wyznaczane są prawe strony równań różniczkowych, i których przyjęcie wpływa na właściwości układu sterowania,
- model obwodowy maszyny z uszkodzeniem wyprowadzony z wykorzystaniem energetycznej funkcji Lagrange'a i funkcji dyssypacji Rayleigha (A. Wilk, G. Kostro)
- układy sterowania skalarne, wektorowe – multiskalarne i zorientowanego połowo oraz układu sterowania bezczujnikowego z maszyną asynchroniczną klatkową oraz pierścieniową,
- modele modulatorów wektorowych,
- transformacje układów współrzędnych Clark i Parka do zaproponowanej metodyki diagnozowania z wykorzystaniem wirujących układów współrzędnych
- modele symulacyjne wybranych struktur estymatorów zmiennych stanu Luenbergera, Kuboty, 3 struktury obserwatorów prof. Krzemińskiego, rozwinięte modele dedykowane do pracy w zakresie osłabiania pola (Adamowicz), obserwator backstepping (Morawiec) i estymator MRAS (Dybkowski),
- rozszerzone i sparametryzowane względem opracowanych w rozprawie doktorskiej modele symulacyjne uszkodzeń, w szczególności związane z asymetrią wewnętrzną maszyny – możliwe modelowanie uszkodzeń poprzez przerwanie lub zmiany rezystancji prętów lub połączeń czołowych wirnika.
- modele dla zaproponowanych metod diagnozowania uszkodzeń.

W pracy [2] **P. Kołodziejek**, E. Bogalecka, "Broken Rotor Symptoms in the Sensorless Control of Induction Machine" The Fifth International Conference & Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVERMONACO 2010, March 25-28, Monte-Carlo, Monaco 2010, przedstawiłem porównanie opracowanego modelu na podstawie nowego podejścia opisanego w rozprawie doktorskiej polegającego na modelowaniu asymetrii z wykorzystaniem definicji wektorów przestrzennych oraz wirujących układów współrzędnych z modelem fizycznym. Potrzeba przeprowadzenia takich badań wynika z wniosków Recenzentów pracy doktorskiej. Badania eksperymentalne potwierdziły występowanie w modelu symulacyjnym harmonicznych uszkodzenia wirnika zidentyfikowanych w rzeczywistym układzie napędowym z układem regulacji.

W pracy [3] P. Kołodziejek, "Rotor Asymmetry Analysis and Diagnosis in the Closed-Loop and Sensorless Controlled Induction Motor Drive", *Sixth International Conference & Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, Monte-Carlo, Monaco 2011*, przedstawiłem wyniki nowych badań eksperymentalnych układu napędowego z uszkodzonym wirnikiem porównując widmo prądu fazowego stojana z przebiegami zmiennych stanu i sterujących w układzie mikroprocesorowym. Przedstawiłem także badania ilościowe określające amplitudę harmonicznym związanych z uszkodzeniami dla szerokiego zakresu zmienności momentu obciążenia i prędkości obrotowej. Badania z wykorzystaniem oscyloskopu cyfrowego wykazały, że w maszynie asynchronicznej pracującej z układem regulacji amplitudy harmonicznym mogą nie być stałe w stanie ustalonym, a ich oscylacyjny charakter uzależnia odczyt amplitudy od chwili pomiaru. Zidentyfikowano, że w analizie prądu fazowego stojana w chwili zmniejszającej się amplitudy harmonicznej związanej z uszkodzeniem wirnika (z lewej strony harmonicznej podstawowej) jednocześnie zwiększana jest amplituda harmonicznej z prawej strony harmonicznej podstawowej o częstotliwości napięcia zasilającego odpowiadająca oscylacji prędkości obrotowej jak przedstawiono na rysunku 2. Aby uniezależnić wpływ chwili pomiaru na wartość amplitudy harmonicznej należy zdaniem autora obliczać ją z wykorzystaniem obu pasm bocznych częstotliwości podstawowej przy założeniu analizy prądu fazowego stojana.



Rys. 2. Analiza harmoniczna prądu fazowego stojana.

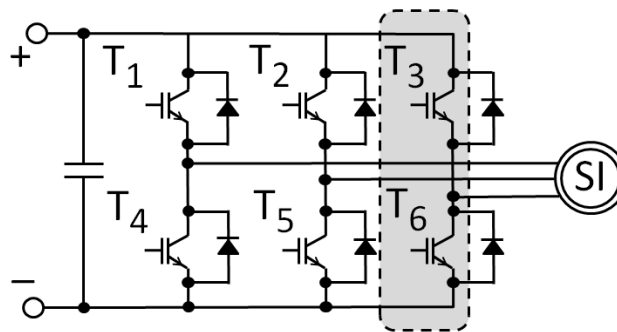


Rys. 3. Rejestrowane wielkości fizyczne w układzie regulacji sterowania multiskalarnego z uszkodzonym wirnikiem.

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla układu napędowego z pomiarem prędkości kątowej wału oraz dla bezczujnikowego układu napędowego (rysunek 3). W układzie napędowym wykorzystano silnik klatkowy SG 132-S4 5,5 kW,  $U_n=400$  [V],  $I_n=10,9$ [A],  $n_n=1450$ [obr./min.]. Parametry schematu zastępczego zidentyfikowano z wykorzystaniem badań próby zwarcia oraz próby biegu jałowego i przeliczono na jednostki względne, a następnie dostrojono indukcyjności z wykorzystaniem zależności dla multiskalarnego modelu maszyny.  $R_s = 0.04828$ ,  $R_r = 0.04547$ ,  $L_s=L_r = 2.05966$ ,  $L_m=1.97013$ . Przedstawiono stabilizowane wyniki amplitudy harmonicznej związanej z uszkodzeniem wirnika identyfikowanej w mechanicznych i elektromagnetycznych zmiennych stanu oraz w zmiennych układu sterowania w układzie napędowym, a także w mocy czynnej i biernej.

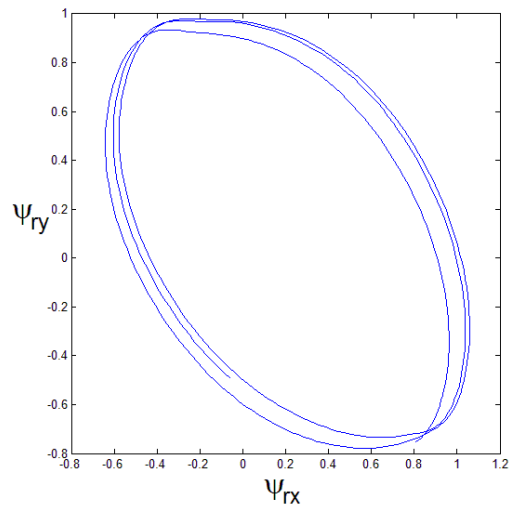
Amplitudy uszkodzenia identyfikowano w przestrzeni zmian momentu obciążenia oraz prędkości kątowej wału w zakresie od 25% do 100% wartości znamionowych. Wyniki badań eksperymentalnych jednoznacznie potwierdziły wielokrotnie wyższą wrażliwość zmiennych linearyzujących dla nieliniowego układu sterowania w porównaniu do harmonicznych uszkodzenia identyfikowanych w zmiennych stanu maszyny. Praktyczne zastosowanie wyników badań związane jest z implementacją bezinwazyjnych metod diagnozowania w czasie rzeczywistym w układzie mikroprocesorowym z wykorzystaniem zmiennych nieliniowego sterowania układu regulacji. W efekcie istnieje możliwość wcześniejszego wykrycia rozwijającego się uszkodzenia co ma istotne, a nawet kluczowe znaczenie dla zasadności, zakresu i skuteczności zastosowania sterowania tolerującego uszkodzenie wirnika.

W pracy [4] **P. Kołodziejek**, „Bezinwazyjna metoda diagnozowania uszkodzenia wirnika silnika indukcyjnego klatkowego zasilanego z przekształtnika” X Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE, Łódź 2011, przedstawiłem badania symulacyjne oraz eksperymentalne zaproponowanej bezinwazyjnej metody diagnozowania uszkodzenia wirnika silnika indukcyjnego klatkowego przy założeniu zasilania przekształtnikowego opartej o wymuszenie pola pulsującego w maszynie. W porównaniu do dotychczas stosowanych metod diagnozowania uszkodzeń wirnika zaproponowana metoda nie wymaga obciążenia silnika, zablokowania wirnika, wymuszenia poślizgu, modyfikacji połączenia układu zasilania ani demontażu wirnika i może być stosowana niezależnie od sposobu pomiaru lub estymacji prędkości kątowej wału. Wymuszenie pola pulsującego może być zrealizowane poprzez programowe wyłączenie z pracy tranzystorów w wybranej gałęzi jak na rys 5.



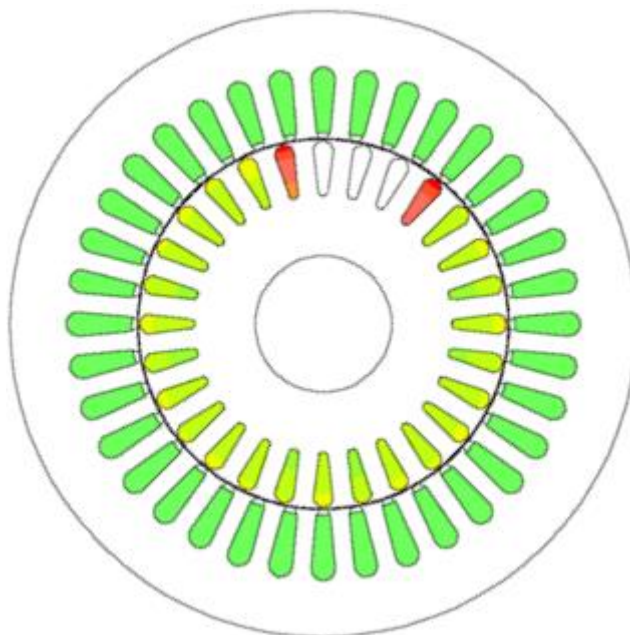
Rys. 5. Schemat 3-fazowego falownika napięcia z nieaktywnymi tranzystorami T3 i T6.

Analiza symulacyjna pracy falownika potwierdziła możliwość wyłączenia programowego w wybranej gałęzi w celu przeprowadzenia procedury diagnostycznej. Z różnych możliwych do wykorzystania metod wnioskowania diagnostycznego w publikacji zaproponowałem wykorzystanie hodografu wektora strumienia wirnika, który w obecności uszkodzenia kreśli pierścień elipsoidalny o szerokości związanej z amplitudą uszkodzenia jak na rys 6.



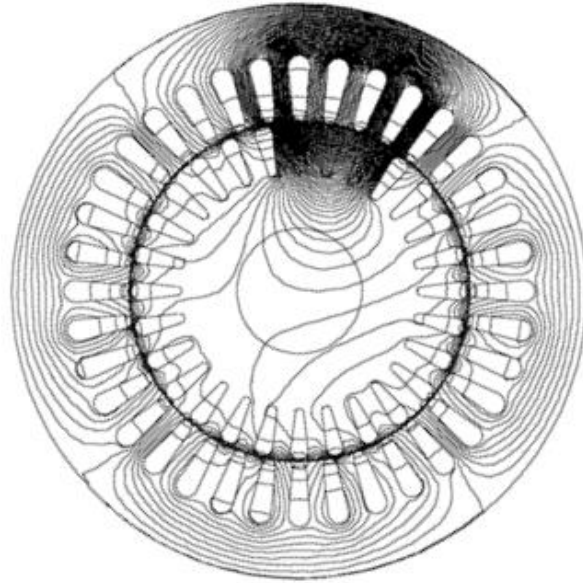
Rys. 6. Hodograf wektora strumienia wirnika przy uszkodzonym wirniku.

Korzystając z narzędzi wspomagających obliczenia polowe (FEMM) przedstawiłem analizę zjawiska asymetrii wirnika. Z przeprowadzonych badań obejmujących wpływ zakresu oraz rozkładu uszkodzenia prętów po obwodzie wirnika określono rozkłady magnetycznego potencjału wektorowego, gęstości prądu oraz indukcji magnetycznej. Przykładowe wyniki badań dla przypadku przerwania 3 sąsiadujących prętów wirnika przedstawiłem w artykule na rysunkach 7-9.

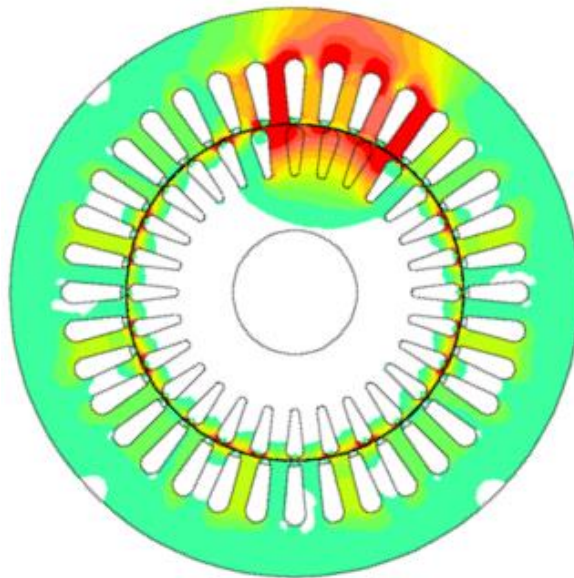


Rys. 7. Rozkład gęstości prądu  $J$  przy uszkodzonych trzech prętach wirnika.





Rys. 8. Rozkład magnetycznego potencjału wektorowego  $A$ .

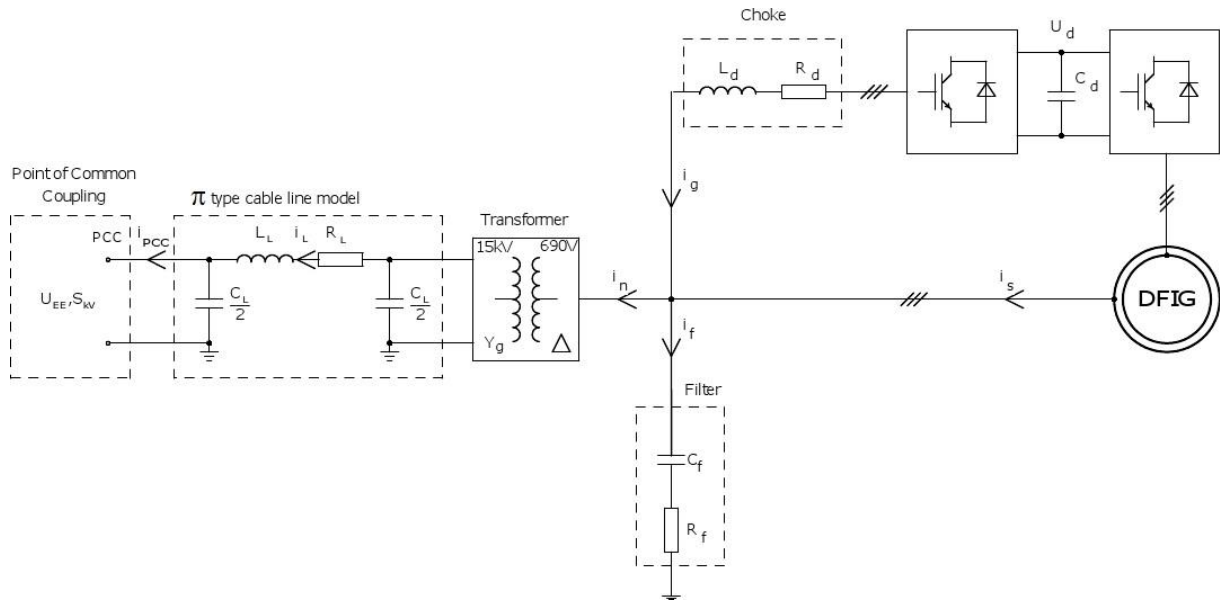


Rys. 9. Rozkład indukcji magnetycznej  $B$ .

Praktyczny wymiar przeprowadzonych badań wskazuje, że dla uszkodzenia 1 pręta wirnika deformacja pola magnetycznego jest niewielka, co uzasadnia trudność diagnozy w początkowym stadium rozwoju uszkodzenia. Wyniki badań połowych wyjaśniają także dlaczego w wyniku rozwoju uszkodzenia przerywane są pręty sąsiadujące z uszkodzonymi. Wynika to ze wzrostu gęstości prądu w tych prętach. Zaproponowałem niesymetryczne zasilanie w układzie napędowym. Metoda ta była stosowana w czasach, kiedy nie były stosowane przemienniki częstotliwości, ale wymagała dodatkowego wyłącznika w wybranej fazie. Możliwość przeprowadzenia nieinwazyjnego badania diagnostycznego z wykorzystaniem falownika wg wiedzy autora nie była dotąd publikowana. Analiza symulacyjna wykazała, że takie zasilanie nie zagraża bezpieczeństwu pracy pośredniego przemiennika częstotliwości z falownikiem napięcia, z którego zasilany jest silnik. Przeprowadzone badania symulacyjne w zakresie pracy silnikowej potwierdziły, że przy takim

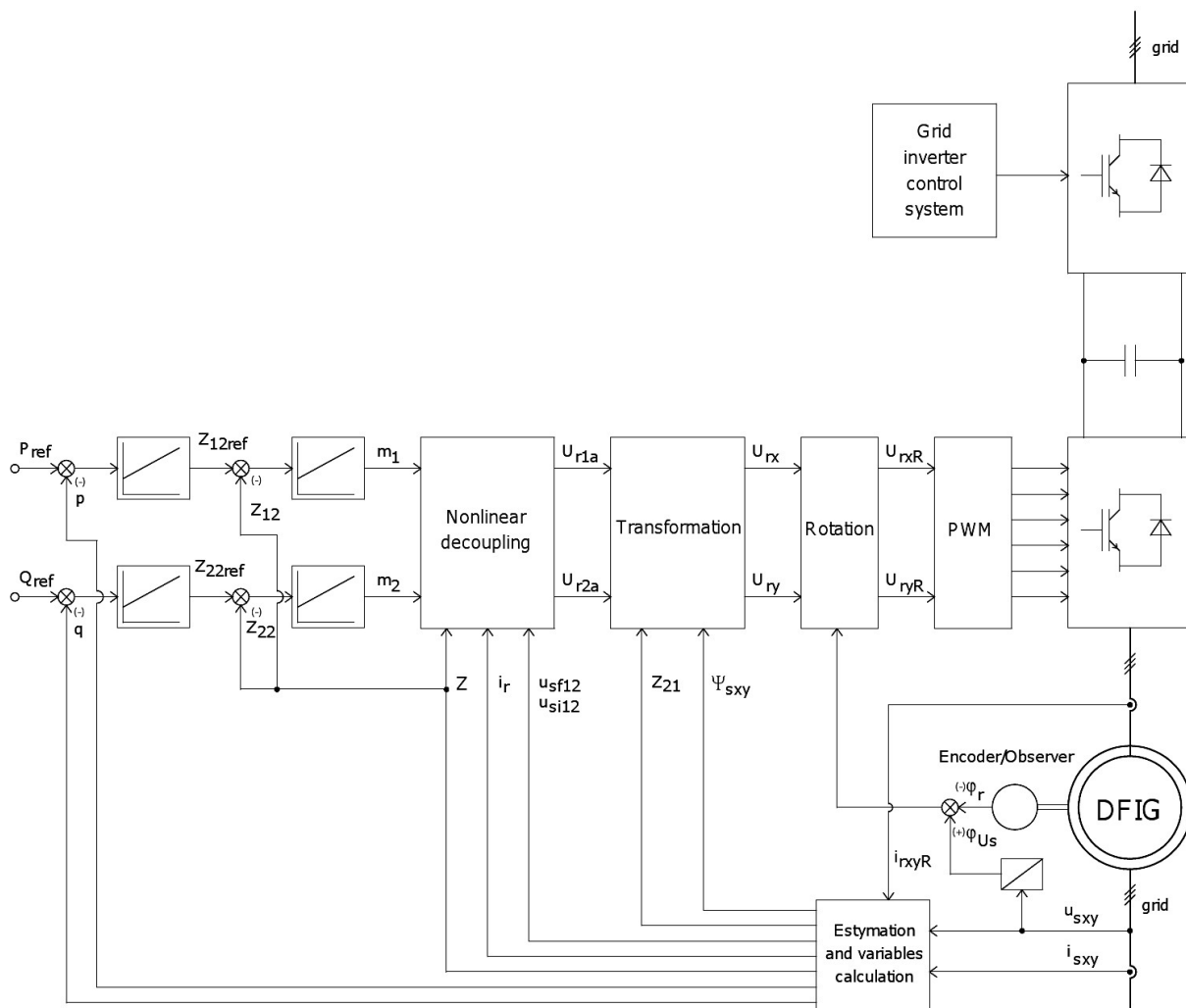
rozwiązaniu prąd w wyłączonej gałęzi nie będzie przepływał przez diody zwrotne tranzystorów. W badanym układzie eksperymentalnym napięcie w obwodzie pośredniczącym było stabilizowane przez falownik sieciowy. Możliwości diagnozowania uszkodzenia wirnika z wykorzystaniem wzbudzenia pola pulsującego w maszynie indukcyjnej były badane symulacyjnie, jednak nie uwzględniały pracy z układem sterowania. W proponowanej metodzie diagnozowania uszkodzenia przyjęto założenie sterowania skalarnego, ze względu na ograniczenie niepewności oraz wpływu regulatorów, estymatorów oraz niestacjonarności modelu maszyny. Wartości chwilowe stałe w stanie ustalonym przy wymuszeniu pola wirującego będą zmienne przy wymuszeniu pola pulsującego w funkcji położenia wektora pola względem uszkodzonej części wirnika. Wynika to ze zmienności parametrów schematu zastępczego związanych z wirnikiem, tj. rezystancji wirnika  $R_r$ , oraz indukcyjności własnej wirnika  $L_r$ , na którą składają się indukcyjność wzajemna  $L_m$  oraz indukcyjność rozproszenia wirnika  $L_{rl}$ . Do procesu diagnozowania zaproponowano wykorzystanie hodografu wektora strumienia wirnika. Diagnozowanie uszkodzenia może zostać także przeprowadzone z wykorzystaniem różnicy amplitudy pulsacji mocy chwilowych i zmiennych pomocniczych jako sygnałów diagnostycznych. Przeprowadzone badania opracowanego połowego modelu maszyny skłoniły do poszukiwania nowego sposobu diagnozowania uszkodzenia wirnika, pozbawionego możliwie wielu ograniczeń aktualnie stosowanych metod. W proponowanej metodzie zaletą braku konieczności obciążenia silnika jest nie tylko brak potrzeby budowy stanowiska, ale przede wszystkim niezależność diagnozy od zmienności obciążenia, które może utrudniać analizę harmoniczną z wykorzystaniem transformaty Fouriera. Istotną zaletą jest również brak konieczności stosowania pomiaru prędkości kątowej wału do celów diagnostycznych, niezależnie od tego, czy oraz jaki układ regulacji jest stosowany. Eliminacja wymienionych ograniczeń i możliwość implementacji względnie nieskomplikowanych algorytmów wnioskowania diagnostycznego zapewniających jednoznaczność oraz wysoką wiarygodność, a także możliwość automatyzacji procesu detekcji uszkodzenia zachęca do stosowania zaproponowanej metody w praktyce. Ponadto przesłankę do opracowania metody diagnozowania maszyny bez dołączonego obciążenia była analiza informacji uzyskanych podczas konsultacji z reprezentantami producentów maszyn asynchronicznych. Przedsiębiorstwa niedysponujące najnowocześniejszą technologią mogą uzyskać przewagę konkurencyjną na rynku dzięki identyfikacji wadliwych maszyn i ograniczenie liczby reklamacji przy utrzymaniu niższych kosztów produkcji.

W pracy [5] **P. Kołodziejek**, "Transient States of the Multiscalar Controlled Double Fed Induction Generator in the Wind Farm" przedstawiłem wyniki badań opracowanego modelu symulacyjnego, którego potrzeba opracowania wynikała z zadań w projekcie badawczym „Kompensacja mocy biernej w farmie wiatrowej”. Maszyny pierścieniowe cechuje naturalna asymetria wynikająca z jej konstrukcji, co stanowiło przesłankę do opracowania modelu symulacyjnego maszyny asynchronicznej pierścieniowej z multiskalarnym układem sterowania od strony wirnika do pracy w układzie maszyny dwustronnie zasilanej pracującej jako generator w elektrowni wiatrowej. Na rysunku 10 przedstawiono schemat modelu symulacyjnego, w którym uwzględniono model transformatora oraz linii kablowej SN od transformatora do punktu przyłączenia elektrowni do sieci elektroenergetycznej.



Rys. 10. Model maszyny dwustronnie zasilanej z układem zasilania, filtrami wyjściowymi, transformatorem i linią kablową do punktu przyłączenia do sieci elektroenergetycznej.

Zamodelowany układ sterowania oparty został o teorię modeli multiskalarnych, wyprowadzonych dla maszyny asynchronicznej pierścieniowej, nazwany typem „Z” (Z. Krzemiński). Schemat zamodelowanego układu sterowania z zadawaniem mocy czynnej oraz biernej przedstawiono na rysunku 11. Model został zweryfikowany poprzez porównanie z wynikami badań eksperymentalnych na stanowisku z maszyną dwustronnie zasilaną pracującą jako generator w elektrowni wiatrowej.

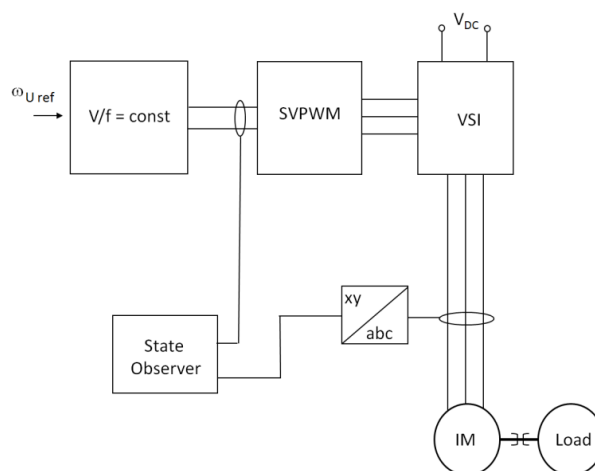


Rys. 11. Model symulacyjny układu sterowania multiskalarnego maszyną dwustronnie zasilaną.

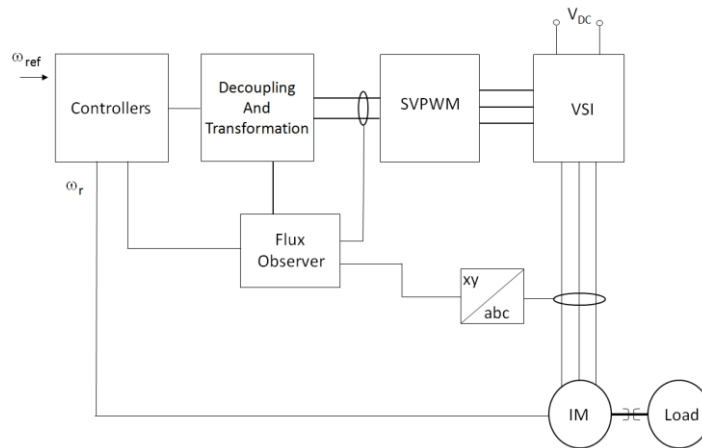
Referat wygłosiłem na konferencji The Tenth IEEE International Conference on Machine Learning and Applications w Stanach Zjednoczonych w 2011 roku. Opracowany model po wprowadzeniu zaproponowanej metodyki modelowania uszkodzeń umożliwia analizę pracy układów napędowego z dedykowanym układem sterowania oraz asymetrią wewnętrzną maszyny, która stanowi istotny i znany problem w generatorach pierścieniowych dużej mocy. Praktyczne znaczenie diagnostyki asymetrii maszyn z wykorzystaniem zaproponowanych metod związane jest zarówno z możliwością oceny jakości wykonania nowego generatora jak i stopnia zużycia.

W pracy [6] **P. Kołodziejek**, E. Bogalecka, "Broken Rotor Symptoms in the Sensorless Control of Induction Machine," *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, No. 1, 2012, Emerald Group Publishing Limited przedstawiono rozszerzone wyniki badań symulacyjnych wrażliwości bezczujnikowego układu sterowania na obecność uszkodzenia wirnika z wykorzystaniem nowej struktury obserwatora prof. Krzemińskiego. Pokazano wpływ uszkodzenia na dokładność estymowanych zmiennych stanu maszyny.

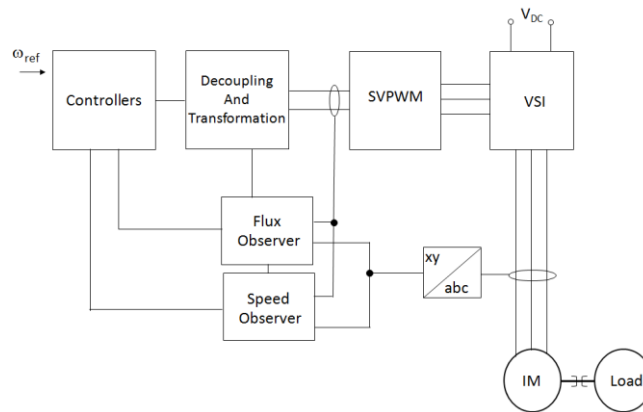
Badania eksperymentalne wrażliwości układów sterowania o zmiennej prędkości wału oraz możliwość wykorzystania obserwatora zmiennych stanu w diagnostyce układu napędowego opublikowane zostały w pracy [7] **P. Kołodziejek**, "State observer based rotor fault diagnostic of the IM drive", *The Seventh International Conference & Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies*, Monte-Carlo, Monaco 2012. Publikacja obejmuje badania eksperymentalne układu napędowego sterowanego skalarnie, multiskalarnie z pomiarem prędkości kątowej wału oraz bezczujnikowo z wykorzystaniem multiskalarnego modelu maszyny przy uszkodzeniu wirnika. Uprozczone blokowe schematy badanych układów sterowania przedstawiono na rysunkach 12-15. Wyniki badań wykazały istotne różnice identyfikowanych amplitud harmonicznnych związanych z uszkodzeniem w przebiegach czasowych rejestrowanych zmiennych stanu i sterujących dla wybranych struktur układów sterowania. Praktyczne znaczenie przeprowadzonych badań związane jest z wykorzystaniem w syntezie systemu diagnozowania układu napędowego w sterowniku mikroprocesorowym, którego propozycję przedstawiono w dalszych badaniach na rysunku 35. Wnioski te nie są ograniczone jedynie do badanego uszkodzenia wirnika, ale także do możliwości diagnozowania innych uszkodzeń oraz nieprawidłowych stanów pracy. Metoda syntezy systemu diagnozowania powinna być zatem ściśle związana z zakresem częstotliwości harmonicznnych uszkodzeń pojawiających się w badanym widmie wybranej wielkości fizycznej.



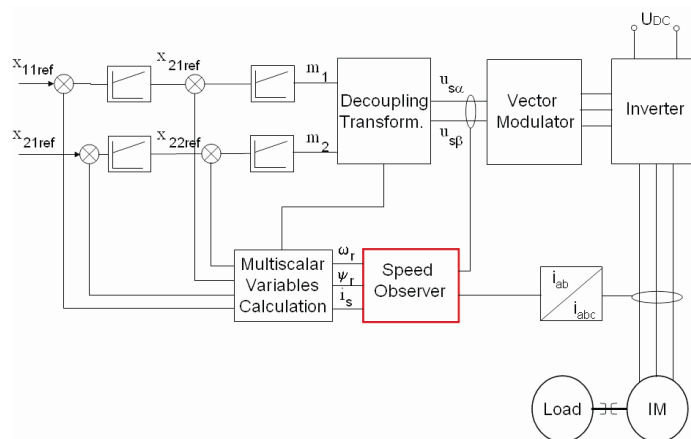
Rys. 12. Układ sterowania skalarnego z obserwatorem zmiennych stanu, w którym odtwarzane zmienne stanu wykorzystywane są w celach diagnozowania.



Rys. 13. Układ sterowania wektorowego z obserwatorem strumienia i pomiarem prędkości kątowej.

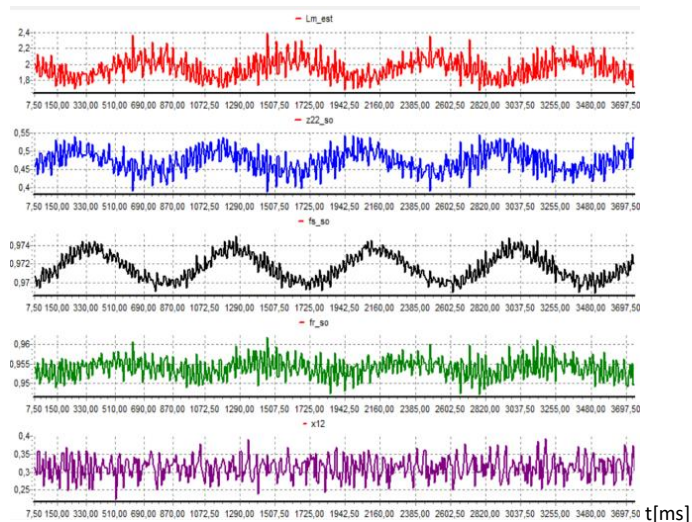


Rys. 14. Układ sterowania bezczujnikowego z obserwatorem strumienia i prędkości kątowej.



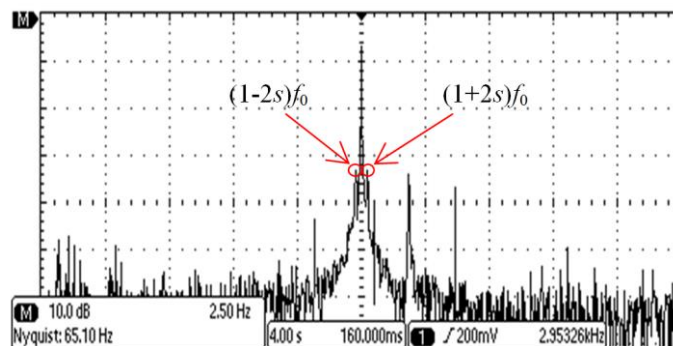
Rys. 15. Układ sterowania multiskalarnego z obserwatorem zmiennych stanu do identyfikacji maszyny i diagnostyki uszkodzeń.

Przykładowe przebiegi rejestrowane w badaniach eksperymentalnych przedstawiono na rysunku 16.

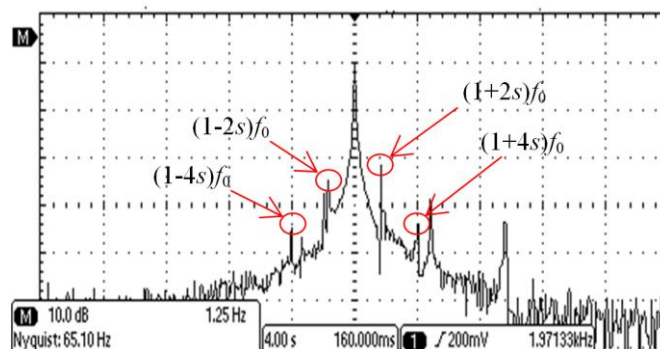


Rysunek 16: Estymowane zmienne stanu i parametry w układzie regulacji z pomiarem prędkości kątowej dla  $\omega_r=0.8$  [j. w.] and  $T_L=0.3$  [j. w.].

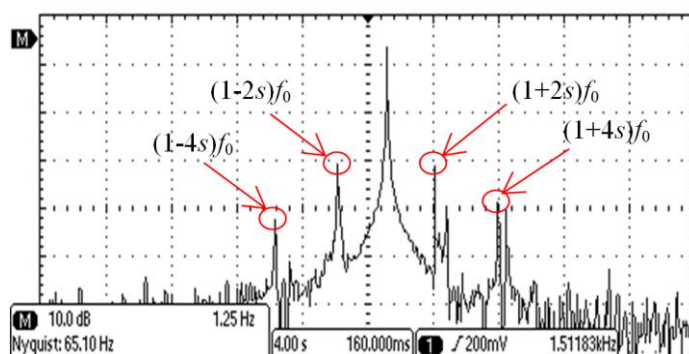
W publikacji [8] **P. Kołodziejek**, “Rotor Asymmetry Analysis and Diagnosis in the Closed-Loop and Sensorless Controlled Induction Motor Drive”, *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* No. 1, 2013 przedstawiono rozszerzone badania eksperymentalne zjawiska uszkodzenia wirnika w bezczujnikowym układzie sterowania z wykorzystaniem analizy harmonicznej prądu fazowego stojana oraz zaawansowanego oscyloskopu cyfrowego i sondy niskopojemnościowej. Badania przeprowadzono dla różnych wartości momentu obciążenia i prędkości kątowej wału. Przykładowe pomiary przedstawiono na rysunku 17.



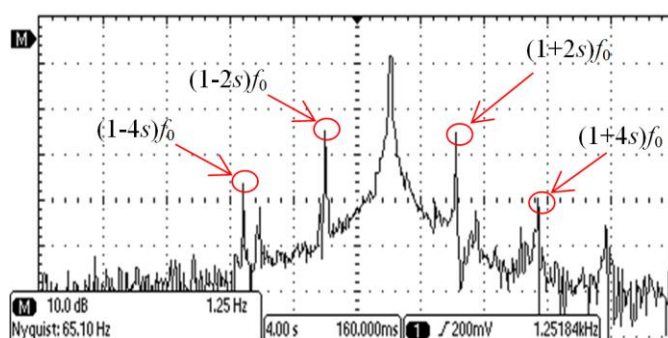
a)



b)



c)



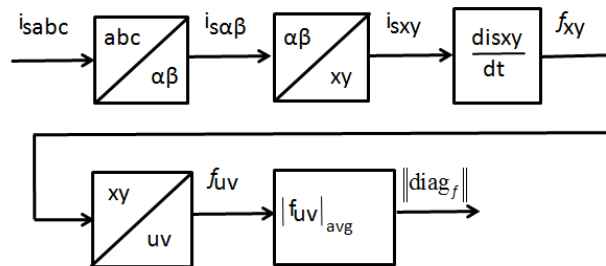
d)

Rysunek 17. Analiza harmoniczna (FFT) prądu fazowego stojana dla prędkości znamionowej i momentów obciążenia a)  $m_0=0$ ; b)  $m_0=0,3$  a)  $m_0=0,5$  a)  $m_0=0,65$  [j. w.].

Analizę wrażliwości z wykorzystaniem wielkości względnych przedstawiono w publikacji w formie stabilizowanej dla multiskalarnego układu sterowania z pomiarem prędkości kątowej oraz dla sterowania bezczujnikowego. Przedstawiono wnioski i praktyczne implikacje wyników badań dotyczące syntezy metod diagnozowania uszkodzeń dla układów napędowych o regulowanej prędkości kątowej wału. W publikacji [9] **P. Kołodziejek**, „Non-invasive method for rotor fault diagnosis in inverter fed induction motor drive”, The Eight International Conference & Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, Monte-Carlo, Monaco 2013, przedstawiono rozszerzone wyniki badań zaproponowanej metody diagnozowania asymetrii wirnika maszyny asynchronicznej opartej o wzbudzenie pola pulsującego poprzez niesymetryczne zasilanie z falownika. Pokazano możliwość identyfikacji uszkodzenia wirnika bez dołączonego obciążenia nie tylko w mierzonym wektorze prądu stojana, ale także przebiegach chwilowej mocy czynnej i biernej oraz w zmiennych sterowania nieliniowego realizujących linearyzację modelu maszyny przez sprzężenie zwrotne. Metodę diagnozowania uszkodzenia z wykorzystaniem transformacji Clark i Parka do reprezentacji wektorów zmiennych stanu i sterujących w wirujących układach współrzędnych zaproponowałem w pracy [10] **P. Kołodziejek**, E. Bogalecka: „Metodyka diagnozowania silnika klatkowego z wykorzystaniem wirujących układów współrzędnych” (Nonstationary reference frame application for induction motor diagnostics in variable speed induction motor drive), XII Konferencja Naukowa

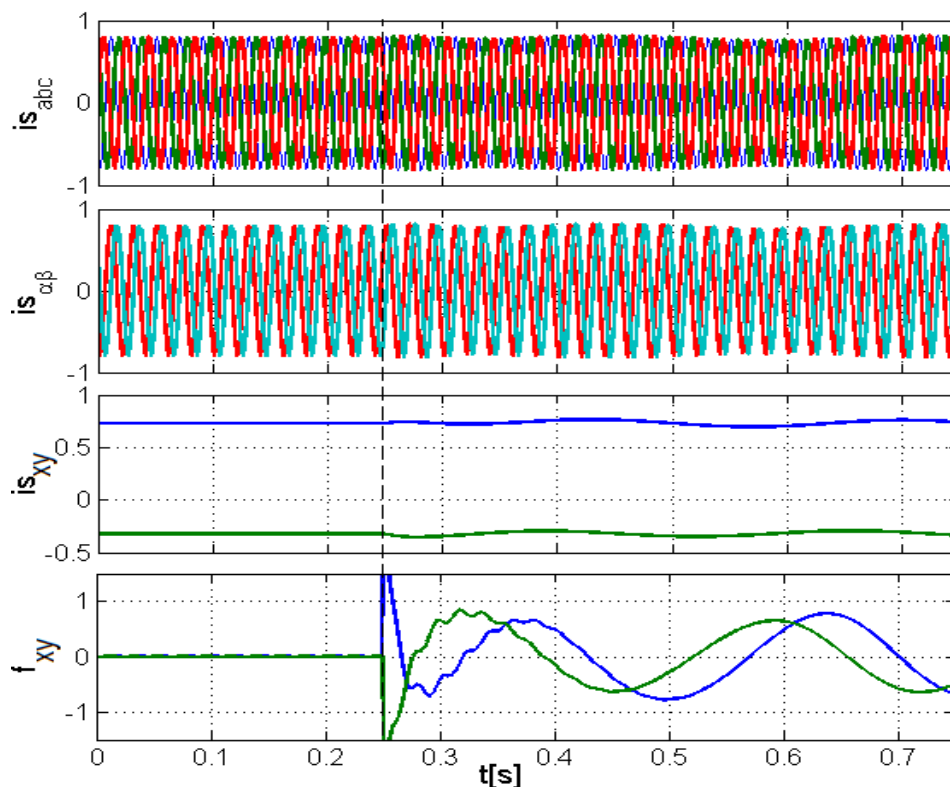


Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'15, Łódź 2015. W syntezie układów sterowania zorientowanych połowo transformacje są wykorzystywane w celu sprowadzenia wektora prądu stojana do układu współrzędnych związanych ze strumieniem wirnika, zatem przekształcenia zaimplementowane w oprogramowaniu układu mikroprocesorowego mogą zostać wykorzystane do procesów diagnozowania uszkodzeń. W artykule jako przykład wybrano uszkodzenie wirnika, niemniej zaproponowana metodyka może być wykorzystana do diagnozowania różnych uszkodzeń. W badaniach symulacyjnych przebadano metodę diagnozowania z wykorzystaniem procedury przedstawionej na rysunku 18.



Rys. 18. Schemat algorytmu diagnozowania uszkodzenia wirnika.

Wyniki badań symulacyjnych na rysunku 19 potwierdzają działanie algorytmu w zakresie izolacji sygnału diagnostycznego z zarejestrowanego przebiegu prądu stojana.

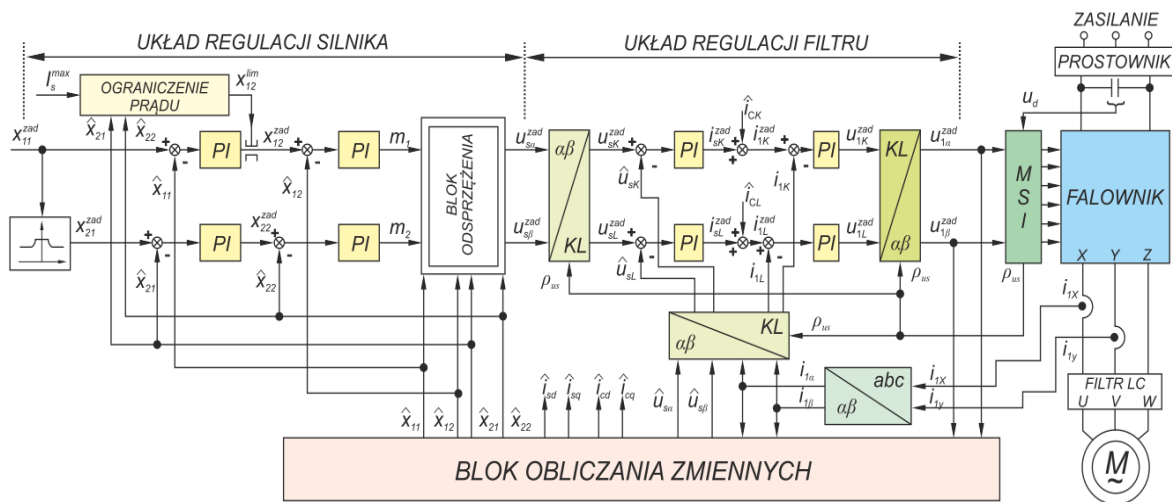


Rys. 19. Badania symulacyjne algorytmu diagnozowania uszkodzenia w oparciu o prąd stojana przed i po uszkodzeniu: a) układ współrzędnych naturalnych  $abc$ , b) ortogonalny układ stacjonarny  $\alpha\beta$ , c) układ wirujący  $xy$ , d) odizolowany sygnał uszkodzenia wirnika. W chwili  $t_0=0,25$  następuje uszkodzenie pręta wirnika.

Zaproponowana metoda ta znajduje zastosowanie w szczególności przy odtwarzaniu sygnałów uszkodzeń o niskich częstotliwościach, przy których stosowanie transformaty Fouriera prądu stojana jest utrudnione ze względu na niestacjonarność badanego sygnału. Metodę tą cechuje mniejsza złożoność obliczeniowa, co zachęca do implementacji w układach mikroprocesorowych do diagnostyki obiektu w czasie rzeczywistym, realizując procesy detekcji, izolacji i identyfikacji uszkodzenia. Ze względu na trudności w różniczkowaniu sygnałów pomiarowych zalecane jest wykorzystanie technik filtracji cyfrowej w celu izolacji składowej stałej, do której sprowadzony jest sygnał diagnostyczny poprzez sprowadzenie do układu wirującego zgodnie z częstotliwością sygnału uszkodzenia.

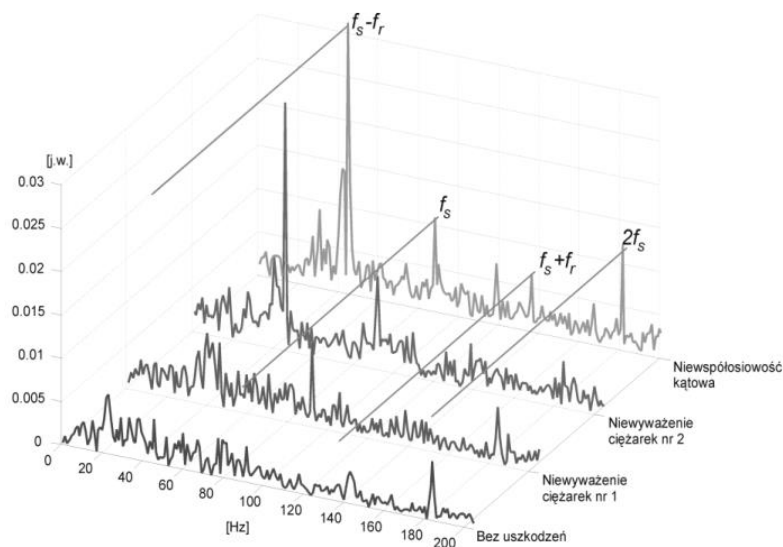
Publikacja [11] **P. Kołodziejek**, „symptomy asymetrii wirnika w układach napędowych o zmiennej prędkościowej wału z silnikiem klatkowym” obejmuje przegląd wyników przeprowadzonych badań i usystematyzowanie wniosków z odniesieniem do badań krajowych ośrodków badawczych.

W pracach [12] J. Guziński, **P. Kołodziejek**, Z. Krzeziński, E. Bogalecka, P. Strankowski: Badanie niezawodności działania napędów elektrycznych// W : Bezpieczeństwo, pomiary i niezawodność w elektroenergetyce/ ed. Krzysztof Nowicki Gdańsk: INFOTECH, 2018, s.54-67 - rozdział w monografii, i [13] J. Guziński, **P. Kołodziejek**, P. Strankowski, „Possibility of Fault Detection in Sensorless Electric Drives”, AUTOMATYKA – ELEKTRYKA – ZAKŁÓCENIA vol. 10, nr 1 (35) 2019, march, ISSN 2082-4149, przedstawiono możliwości diagnozowania niewyważenia i ekscentryczności w beczujnikowym układzie napędowym z filtrem sinusoidalnym opisanym w literaturze (J. Guziński). Schemat układu sterowania multiskalarnego rozszerzonego o model filtra sinusoidalnego przedstawiono na rys. 20.



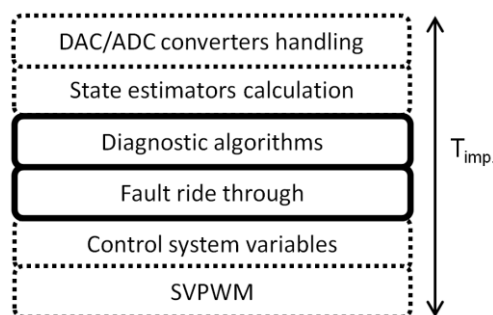
Rys. 20. Struktura układu sterowania multiskalarnego i filtrem wyjściowym falownika napięcia [13].

Przykładowe wyniki eksperymentalne procesu diagnozowania metodą analizy harmonicznej estymowanego momentu obciążenia przedstawiono na rysunku 21.



Rys. 21. Porównanie widm estymowanego momentu obciążenia dla wybranych uszkodzeń [13].

Nadrzędną motywacją poszukiwania metod diagnozowania była próba powiązania teorii diagnostyki systemów wywodzącej się z teorii sterowania (J. Korbcicz, J.M. Kościelny, W. Cholewa, Z. Kowalczyk, R. J. Patton, R. Isserman, P.M. Frank i inni) z metodami diagnozowania napędów elektrycznych wywodzących się z diagnostyki eksploatacyjnej maszyn elektrycznych, w tym rozszerzonymi o zaawansowane algorytmy wnioskowania diagnostycznego z wykorzystaniem m. in. metod sztucznej inteligencji (R. Glinka, Cz. T. Kowalski, L. Swędrowski, T. Sobczyk, A. Sołbut, A. Wilk i inni). Kolejną przesłanką do poszukiwania uniwersalnych i bezinwazyjnych metod diagnozowania była możliwość ich praktycznego wykorzystania poprzez implementację w układzie mikroprocesorowym wykorzystywanym w układzie napędowym do sterowania maszyną. W wyniku dynamicznego rozwoju napędów z maszynami asynchronicznymi, układy te znalazły zastosowanie w pojazdach elektrycznych, elektrowniach wiatrowych średniej i małej mocy, a nawet w serwonapędach. W układach takich zwykle stosuje się zewnętrzne systemy automatyki zabezpieczeniowej. Zaproponowane w opisanych pracach rozwiązania mają na celu automatyzację procesów diagnostyki – detekcję, izolację i identyfikację uszkodzeń - w układzie sterowania układem napędowym w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem pozostałego czasu przerwania procesora związanego z okresem impulsowania układu regulacji jak pokazano na rysunku 22.



Rys. 22. Obliczenia realizowane w mikroprocesorze przy sterowaniu bezczujnikowym w przerwaniu wyzwalanym zgodnie z przyjętym czasem impulsowania.

Takie założenie umożliwia diagnostykę w czasie rzeczywistym na poziomie sterowania lokalnego. Szczególną zaletą takiego podejścia jest możliwość implementacji sterowania tolerującego uszkodzenia zapewniającego utrzymanie pracy układu napędowego w stanach anormalnych oraz w przypadku wybranych uszkodzeń w ograniczonym zakresie. Możliwości i zakres zastosowania sterowania tolerującego uszkodzenia jest ściśle związany z jakością oraz szybkością procesów diagnozowania prowadzących do identyfikacji uszkodzenia. Najczęściej wykorzystywane podejście do diagnozowania maszyn prądu przemiennego oparte jest na analizie widma obliczanego z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera z wybranym oknem czasowym – funkcją opisującą sposób pobierania próbek z sygnału jak w pracy [8] na rysunku 4. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że zastosowanie tej metodyki w implementacji automatycznego i bezinwazyjnego algorytmu diagnozowania w układzie sterowania nie jest korzystne, ponieważ wymaga znacznych nakładów obliczeniowych w celu wyznaczenia pełnego widma, a następnie jego cyfrowego przetwarzania w procesie wnioskowania diagnostycznego. Stawiane wymagania niezawodności procesów diagnozowania nie pozwalają na przyspieszenie obliczeń poprzez skrócenie okna pomiarowego i ograniczenie rozdzielczości widma. Na podstawie przeprowadzonej analizy symptomów uszkodzeń w maszynach asynchronicznych oraz analizy istniejącego stanu wiedzy na temat uszkodzeń, zaproponowano metodykę diagnozowania realizowanego automatycznie w czasie rzeczywistym w mikroprocesorze z wykorzystaniem algorytmów do efektywnego wyznaczania amplitud harmonicznych od uszkodzeń zamiast pełnego widma. Częstotliwość poszukiwanych harmonicznych można wyznaczyć na podstawie mierzonych i estymowanych zmiennych stanu maszyny w układzie sterowania. Symptomy takich uszkodzeń widoczne są w widmie jako pojedyncze lub grupy harmonicznych o znanych, opisanych matematycznie częstotliwościach, które w zależności od rodzaju są powiązane z określonymi zmiennymi stanu maszyny. W badaniach symulacyjnych zaproponowane podejście potwierdziło postawioną hipotezę badawczą dotyczącą możliwości znacznie efektywniejszego diagnozowania uszkodzeń zaproponowaną metodyką. Do potwierdzenia hipotezy badawczej niezbędne było przeprowadzenie badań eksperymentalnych ze względu na ryzyko badawcze związane z przewidywanym problemem dokładności estymacji zmiennych stanu w układzie sterowania, od której uzależniona jest dokładność wyznaczenia częstotliwości harmonicznych związanych z uszkodzeniem, których obliczane amplitudy są następnie przetwarzane w procesie wnioskowania diagnostycznego. Do rozwiązania tego problemu zaproponowano ewentualne wykorzystanie pętli synchronizacji fazowej, której wykorzystanie pozwoli na dostrojenie częstotliwości poszukiwanego uszkodzenia do jego rzeczywistej częstotliwości kosztem istotnego wydłużenia czasu procesu diagnozowania, który Autor uznaje za kluczowy w zastosowaniu praktycznym. Badania eksperymentalne, które polegały na zaimplementowaniu zaproponowanej bezinwazyjnej metody diagnozowania w układzie sterowania, potwierdziły prawidłowe działanie zaproponowanej metody. Brak konieczności dostrajania częstotliwości z wykorzystaniem pętli synchronizacji fazowej wynika z wystarczająco wysokiej dokładności identyfikacji zmiennych stanu maszyny przez obserwatory zmiennych stanu wykorzystywane w bezczujnikowym układzie sterowania opartym na multiskalarnym modelu maszyny (Z. Krzemiński) opracowanym i rozwijanym od 30 lat w Katedrze Automatyki Napędu Elektrycznego i Konwersji Energii Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Badania symulacyjne wpływu niedokładności estymacji składowych harmonicznych związanych z uszkodzeniem w przestrzeni zmiennego momentu

obciążenia oraz prędkości kątowej przeprowadzono w celu określenia możliwości zastosowania zaproponowanej metodyki diagnozowania w układzie mikroprocesorowym uszkodzeń poprzez bezpośrednie wyznaczenie harmonicznym związanych z uszkodzeniami. Do wyznaczenia harmonicznym związanych z uszkodzeniami zastosowano rekursywny algorytm wyznaczenia transformaty Fouriera (RDFT- Recursive Discrete Fourier Transform) oraz algorytm Goertzela. Rekursywną transformatę Fouriera obliczano wykorzystując wzory:

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} a_n w_N^{-kn}$$

$$X_k(n) = X_k(n-1) + (x(n) - x(n-N)) w_N^{-kn}$$

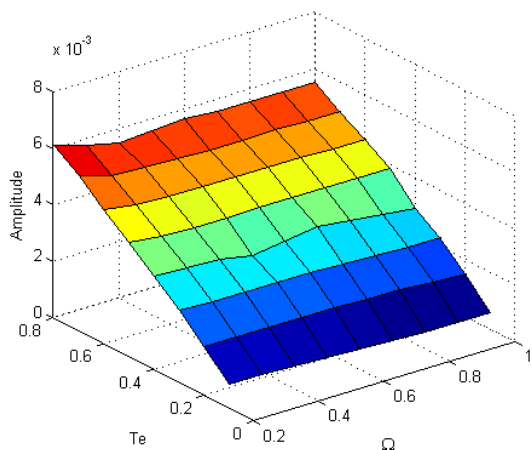
gdzie kolejne wartości badanej harmonicznym aktualizowane są co każdą próbkę badanego sygnału w oknie przesuwym. Problem zastosowania rekursywnego obliczania transformaty Fouriera związany jest z kumulacją błędów wynikających z ograniczonej dokładności reprezentacji liczb w zapisie binarnym i z błędów pomiarowych. Z wielu możliwych metod kompensacji tych błędów zdecydowano na okresowe resetowanie algorytmu, ze względu na dopuszczalne przerwy w działaniu algorytmu.

Algorytm Goertzela zastosowany do diagnozowania uszkodzenia opisują równania:

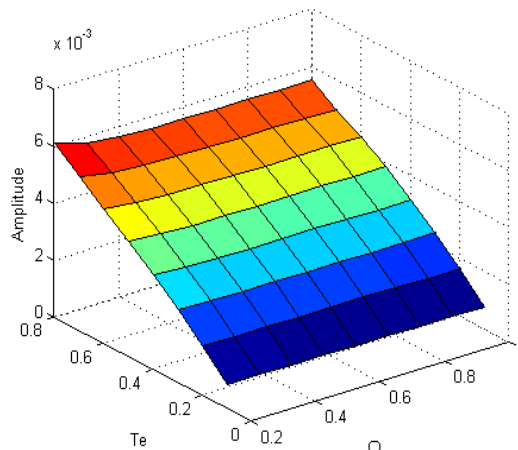
$$u_k(n) = x(n) + 2 \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) u_k(n-1) - u_k(n-2)$$

$$y(n) = u_k(n) - w_N^{-k} u_k(n-1)$$

Warto zwrócić uwagę na niewielką złożoność obliczeniową tego algorytmu. Co próbkę obliczane jest jedynie pierwsze równanie, a drugie równanie obliczane jest tylko na koniec okna. W pierwszym równaniu występuje wyrażenie  $2\cos(\dots)$ , które przyjmuje wartość stałą – w przeciwieństwie do RDFT, gdzie w argumentach funkcji trygonometrycznych (występujących przy zamianie  $w_N^{-kn}$  na część rzeczywistą i urojoną) występuje numer próbki. W przypadku RDFT można rozwiązać ten problem tabularyzując wartości funkcji trygonometrycznych dla  $n$  od 1 do  $N$ , jednak wiąże się to z wykorzystaniem dodatkowych zasobów pamięci, co w odniesieniu do parametrów aktualnie dostępnych mikroprocesorów nie stanowi istotnego ograniczenia. Wyniki badań symulacyjnych z założeniem braku uchybu estymacji poślizgu przedstawiono na rys. 23.



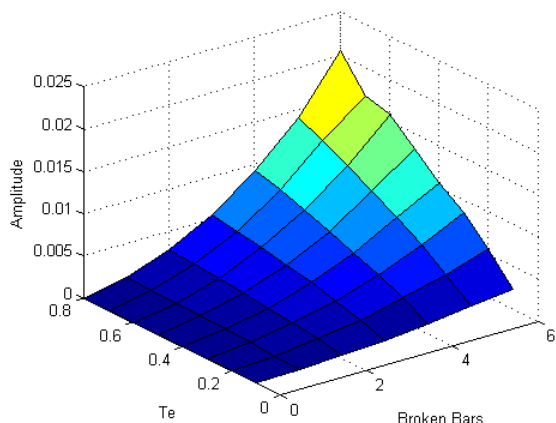
a)



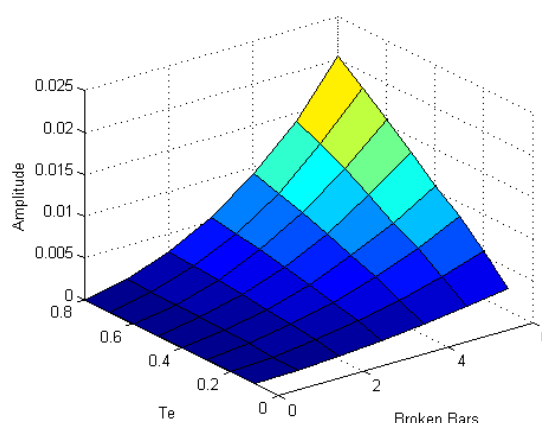
b)

Rys. 23. Wyznaczone częstotliwości uszkodzenia wirnika w układzie regulacji z wykorzystaniem algorytmów a) RDFT and b) Goertzela przy uszkodzeniu 3 prętów wirnika oraz przy braku błędu estymacji poślizgu.

Wyniki badań symulacyjnych dla różnego zakresu uszkodzenia wirnika przedstawiono na rysunku 24.



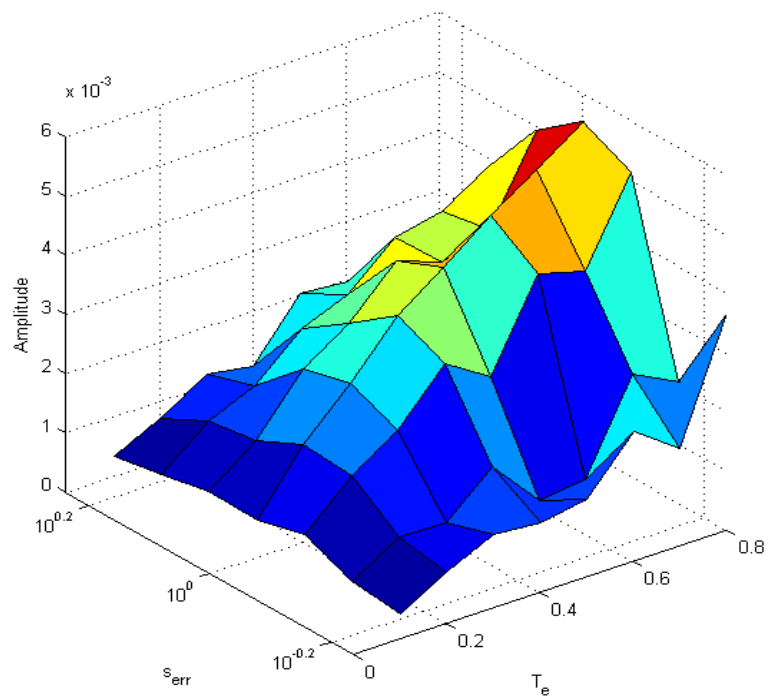
a)



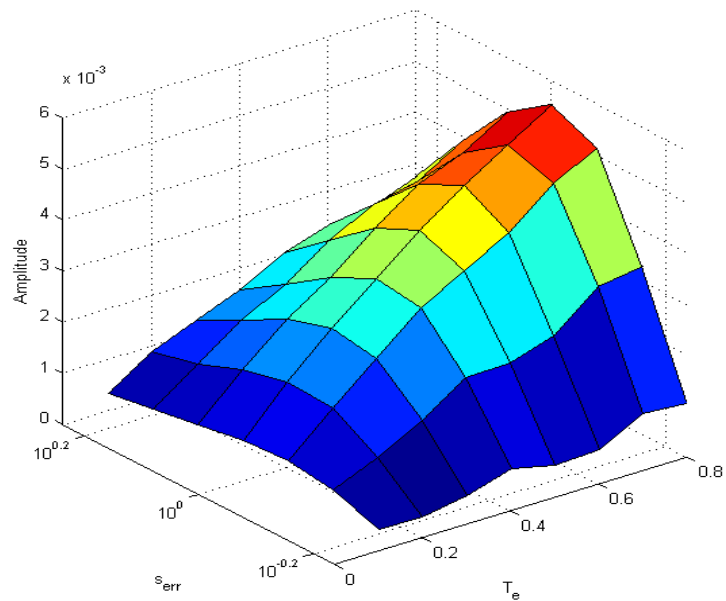
b)

Rys. 24. Estymacja częstotliwości uszkodzenia wirnika względem liczby uszkodzonych prętów oraz względem funkcji momentu obciążenia z wykorzystaniem algorytmów a) RDFT and b) Goertzela.

Wyniki badań wpływu uchybu estymacji poślizgu na dokładność wyznaczenia amplitudy składowych harmonicznych związanej z uszkodzeniem wirnika przedstawiono na rysunku 25.



a)



b)

Rys. 25. Wpływu uchybu estymacji położenia w obserwatorze na dokładność wyznaczenia amplitudy składowych harmonicznych związanej z uszkodzeniem wirnika z wykorzystaniem algorytmu a) RDFT and b) Goertzela przy uszkodzeniu 3 prętów wirnika.

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie badań eksperymentalnych na stanowisku z silnikiem klatkowym o mocy 5,5kW zasilanym z pośredniego przemiennika częstotliwości z falownikiem napięcia sterowanym multiskalarnie. W silniku uszkodzone były 3 sąsiadujące pręty wirnika. Algorytmy estymacji amplitud harmonicznych związanych z uszkodzeniem wirnika (RDFT oraz Goertzela) zostały zaprogramowane w sterowniku mikroprocesorowym. Przykładowe zarejestrowane przebiegi estymacji amplitudy harmonicznej związanej z uszkodzeniem przedstawiono na rysunku 26. Porównanie wyników odtwarzanych składowych uszkodzenia dla układów sterowania skalarnego oraz bezczujnikowego dla różnych wartości prędkości obrotowej oraz momentu obciążenia zestawiono w tabelach I i II.

TABELA I. Sterowanie skalarnie z pomiarem prędkości.

$\omega_r$	$x_{12}$	GDFT_Ku[dB]	RDFT_Ku[dB]
0,3	0,5	19,1	19,1
0,3	0,72	13,5	12,0
0,65	0,25	20,8	20,8
0,65	0,5	25,1	25,1
0,65	0,72	28,0	27,6
1	0,25	22,3	22,3
1	0,5	19,1	19,1
1	0,72	13,4	13,4

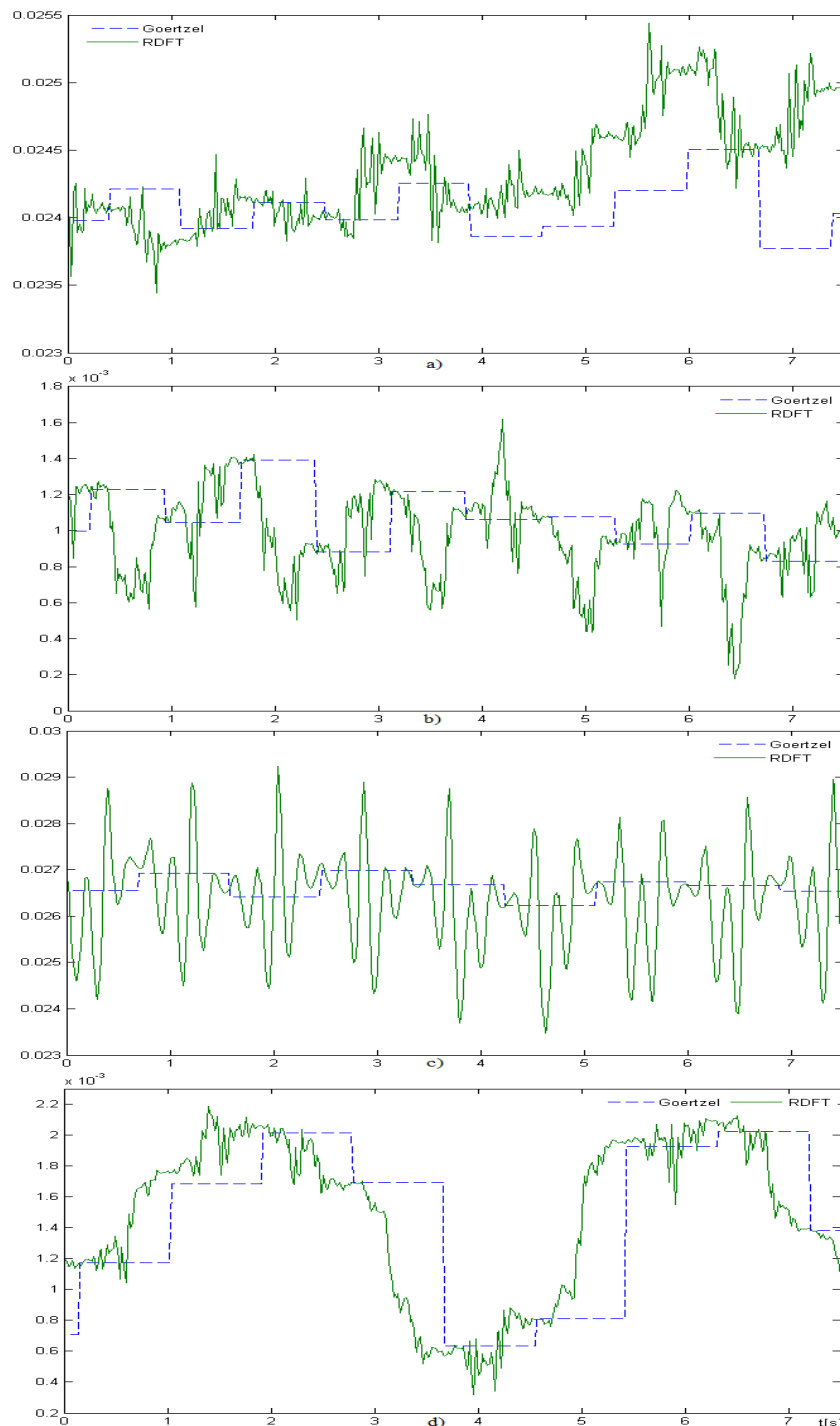
TABELA II. Sterowanie bezczujnikowe.

$\omega_r$	$x_{12}$	GDFT_Ku[dB]	RDFT_Ku[dB]
0,3	0,5	20,4	20,4
0,3	0,72	15,6	16,7
0,65	0,3	15,6	14,0
0,65	0,5	25,1	25,1
0,65	0,72	22,6	22,6
1	0,35	6,0	6,0
1	0,5	9,5	9,5
1	0,72	15,2	15,2

W przeprowadzonym cyklu badań symulacyjnych i eksperymentalnych na przykładzie uszkodzenia wirnika potwierdzono zasadność zaproponowanej metodyki do diagnozowania różnych rodzajów uszkodzeń w układzie mikroprocesorowym poprzez bezpośrednie wyznaczenie składowych harmonicznych w układach sterowania skalarnego, wektorowego oraz bezczujnikowego. Szczegółowe wnioski wskazują na korzystniejsze stosowanie algorytmu Goertzel'a, ze względu na charakterystykę wpływu niedokładności estymacji poślizgu na dokładność wyznaczenia amplitudy harmonicznej wykorzystywanej do określenia zakresu uszkodzenia. Ponadto przedstawione na rysunku 11 przebiegi wskazują, że w algorytmie Goertzel'a wartości są wygładzone, zatem nie jest wymagane dodatkowe zastosowanie technik filtracji cyfrowej. Korzyści wynikające ze stosowania zaproponowanego podejścia związane są z istotnym zmniejszeniem ilości niezbędnych operacji matematycznych, a przez to skrócenie czasu niezbędnych obliczeń w procesach diagnozowania, co jest istotne w układach mikroprocesorowych znacznie obciążonych zaawansowanymi algorytmami estymacji zmiennych stanu oraz obliczeniami zmiennych nieliniowego układu sterowania. Warto zauważyć, iż stosowanie układów mikroprocesorowych o najwyższej aktualnie dostępnej szybkości obliczeń oraz pojemności pamięci może utrudniać komercjalizację poza granicami kraju takich układów, z uwagi na przepisy ograniczające możliwość ich wykorzystania do zabronionych celów.



Ponadto czas rozwoju niektórych uszkodzeń jest krótki, np. uszkodzenia uzwojeń stojana silnika klatkowego, zatem czas diagnozowania może mieć kluczowe znaczenie dla skutków awarii.



Rys. 26. Przebiegi amplitudy harmonicznej związanej z uszkodzeniem odtwarzanej wirnika z wykorzystaniem algorytmów RDFT i Goertzela przy uszkodzeniu 3 prętów wirnika dla  $\omega_r=0.65$ ,  $T_L=0.72$  i a) sterowania skalarnego ( $U/f=\text{const.}$ ) przy uszkodzonym wirniku b) sterowania skalarnego przy nieuszkodzonym wirniku, c) układu regulacji przy uszkodzonym wirniku d) układu regulacji przy nieuszkodzonym wirniku.

Na podstawie wniosków z przeprowadzonych badań zaproponowanych częstotliwościowych metod diagnozowania przedstawiono kolejną koncepcję diagnozowania uszkodzeń zorientowaną na praktyczne zastosowanie zrealizowaną na przykładzie uszkodzenia wirnika. Przyjęto założenie diagnozowania uszkodzeń w dziedzinie czasu. Do opracowania metody przesłanki stanowiły wymagania i ograniczenia metod częstotliwościowych związane z warunkiem przeprowadzania pomiarów w czasie ustalonej pracy napędu oraz dość kłopotliwa i czasochłonna w warunkach przemysłowych identyfikacja harmonicznym o niskich częstotliwościach zapewniająca akceptowalną rozdzielczość widma (z wykorzystaniem FFT). Uwzględniając, że uszkodzenie wirnika rozwija się stopniowo i nie doprowadza w czasie rzędu kilku sekund do awarii zaproponowano rozwiązanie, które pozwala na ocenę sygnału diagnostycznego na podstawie jego przebiegu czasowego. Przyjmując, że częstotliwości uszkodzenia wirnika są opisane zależnością:

$$f_b = (1 \pm 2ks) f_0,$$

do wzmocnienia sygnału od uszkodzenia przyjęto człon oscylacyjny jako filtr pasmowo-przepustowy opisany transmitancją:

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

gdzie,  $k$  – współczynnik wzmocnienia,  $\omega_n$  – pulsacja drgań własnych,  $\zeta$  – współczynnik tłumienia,

którego zastosowanie wymaga odpowiedniego doboru współczynnika tłumienia, co sprowadza się do zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej. Ze względu na uzależnienie częstotliwości uszkodzenia wirnika od poślizgu, który zależy od prędkości kątowej wału oraz częstotliwości napięcia zasilającego. W układzie regulacji oddziałującym na wartość poślizgu w celu realizacji automatycznego systemu diagnozowania w czasie rzeczywistym zaproponowano zwiążanie pulsacji drgań własnych  $\omega_n$  z częstotliwością uszkodzenia wirnika  $f_b$ . Uwzględniając, że przyjmują wartości zmienne w czasie można zatem zapisać:

$$\omega_n(t) = f_b(t)$$

Kryteria doboru współczynnika tłumienia dotyczą ograniczenia pasma przenoszenia, aby nie wzmocniać sąsiadujących harmonicznym niezwiążanych z uszkodzeniem, a z drugiej strony zapewnić wzmocnienie sygnału diagnostycznego w zakresie błędów estymacji poślizgu oraz częstotliwości zwiążanej z uszkodzeniem. Ponadto wraz ze zmniejszaniem współczynnika tłumienia wydłużony zostaje czas stanu przejściowego, a przez to czas procesu diagnozowania. Składowa przejściowa filtra jest opisana zależnością:

$$T = \frac{1}{\omega_n \zeta}$$

Badany sygnał, np. moduł prądu stojana, w stanie ustalonym jest wartością stałą z nałożonymi składowymi o częstotliwościach związanych z uszkodzeniami maszyny. W przypadku podania takiego sygnału na wejście zaproponowanego filtra, na wyjściu pojawi się sygnał zawierający także składową stałą o amplitudzie  $k$  razy większej od składowej stałej na wejściu. W celu ułatwienia analizy sygnału wyjściowego, korzystniej jest wyeliminować składową stałą z tego sygnału, dlatego do filtra wprowadzono człon różniczkujący. Ostatecznie transmitancja jest następującej postaci:

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2 s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

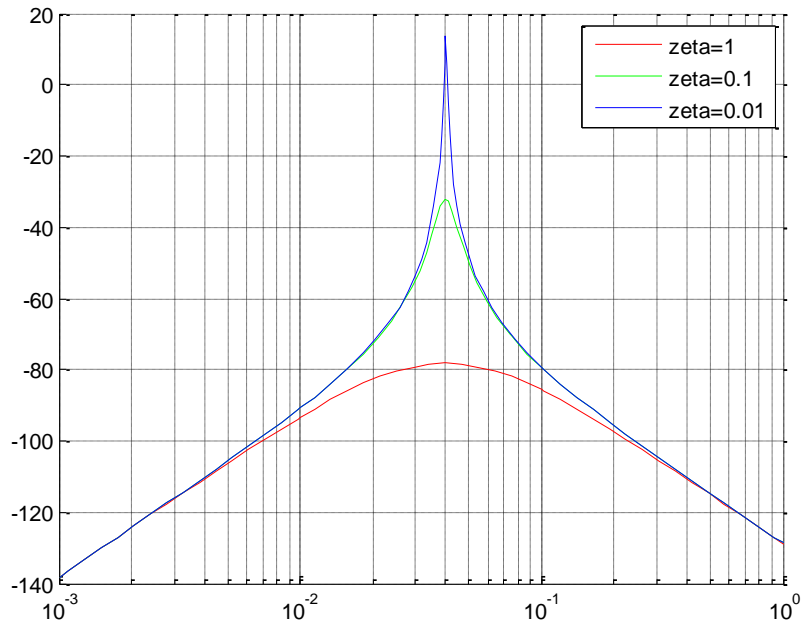
Równania stanu i wyjścia filtra przyjmują postać:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\omega_n^2 x_1(t) - 2\omega_n \zeta x_2(t) + k\omega_n^2 u(t)$$

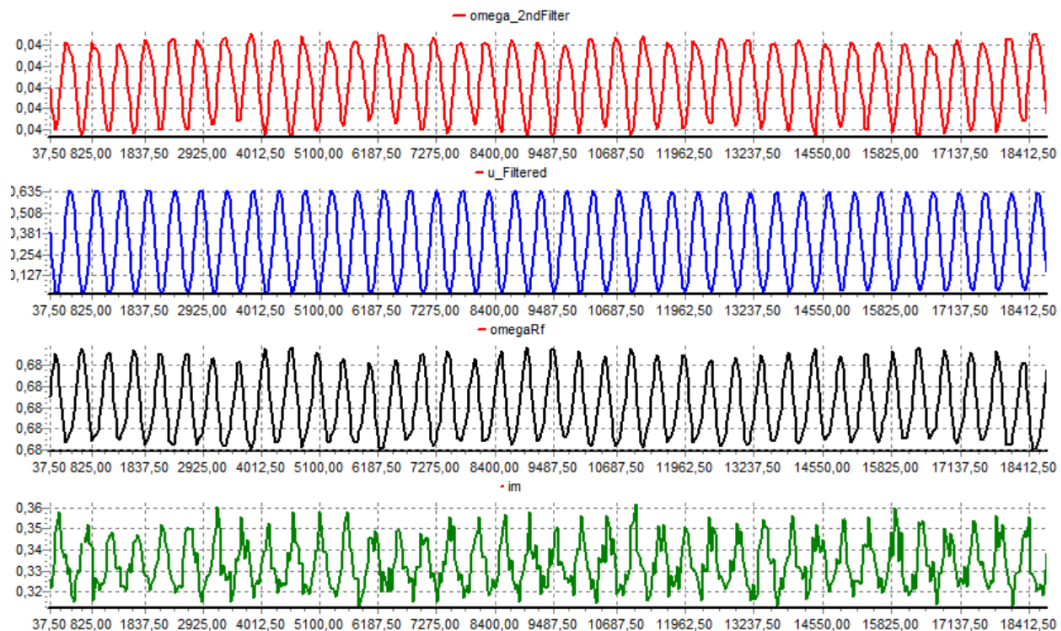
$$y(t) = x_2(t)$$

Dla podanego filtra charakterystyki amplitudowo częstotliwościowe dla  $\omega_n=0,04$ ;  $k=1$  oraz różnych wartości  $\xi$  (zeta) przyjmują postać jak na rysunku 27.

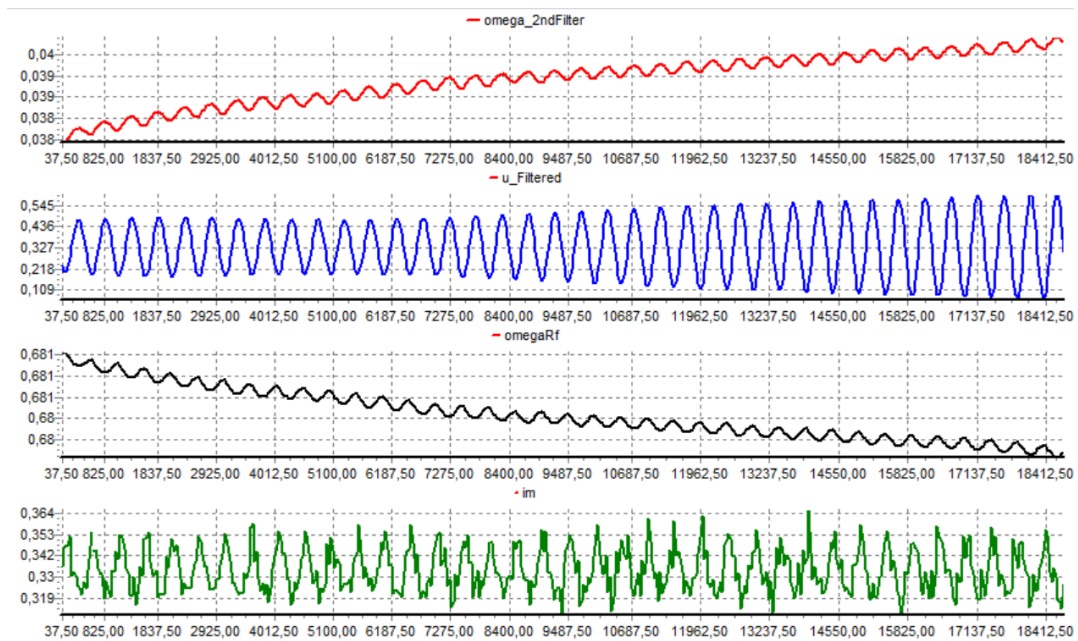


Rys. 27. Charakterystyki przenoszenia filtra dla  $\omega_n=0,04$ ,  $k=1$  i wybranych wartości  $\xi$  (zeta).

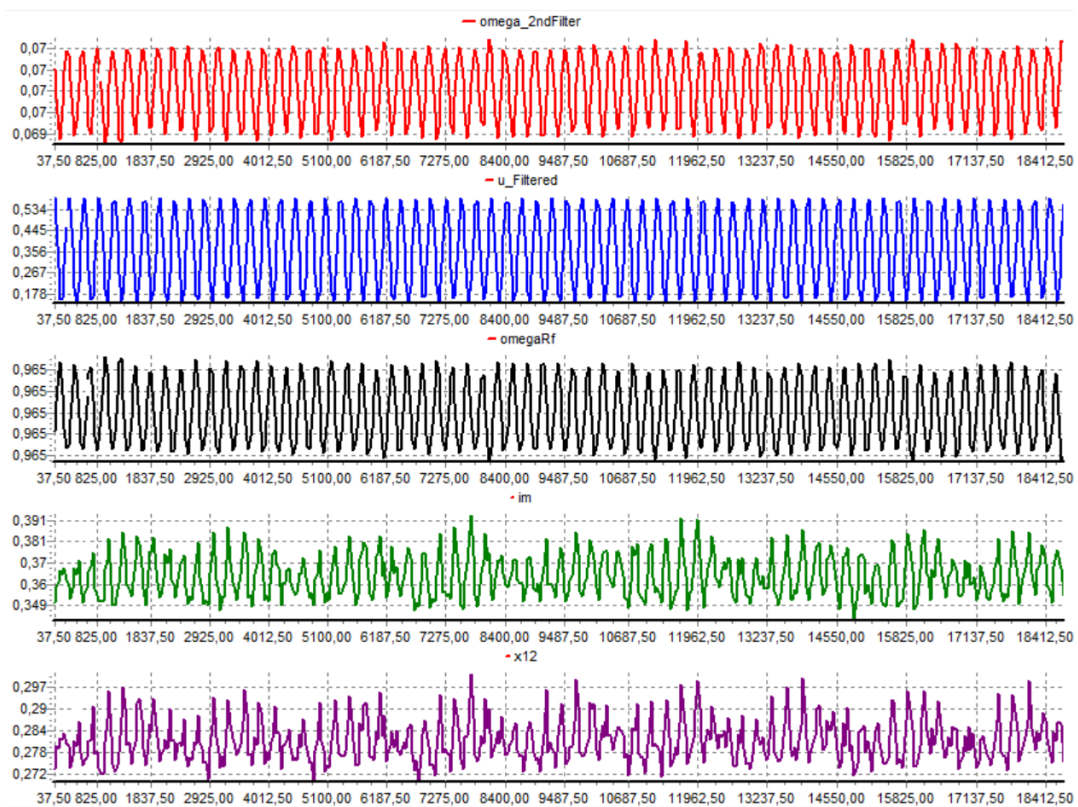
Powyższy model filtra zaprogramowano w sterowniku mikroprocesorowym i przeprowadzono badania eksperymentalne w układzie napędowym z uszkodzonym silnikiem klatkowym o mocy 5,5kW zasilany z pośredniego przemiennika częstotliwości z falownikiem napięcia. Badano układy sterowania skalarne, wektorowe, w tym bezczujnikowe dla małych i dużych wartości współczynnika tłumienia  $\xi$  przy uszkodzonym i nieuszkodzonym wirniku w stanach przejściowych i ustalonych. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rysunkach 28-35.



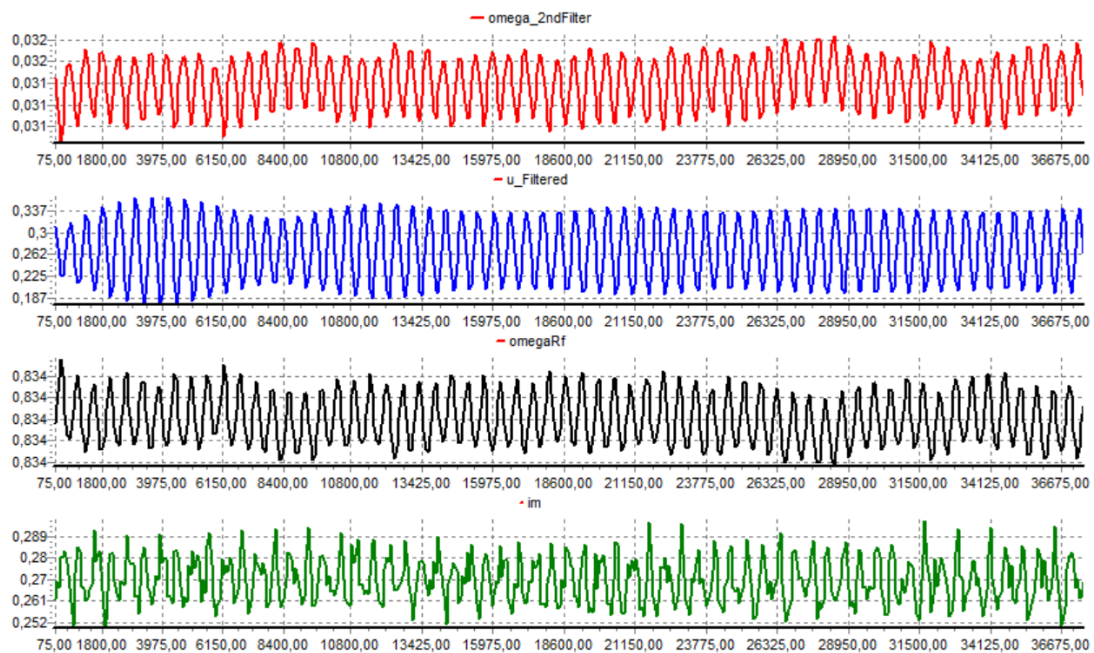
Rys. 28. Przebiegi zmiennych filtrowanych w adaptacyjnym filtrze detekcyjnym w stanie ustalonym.



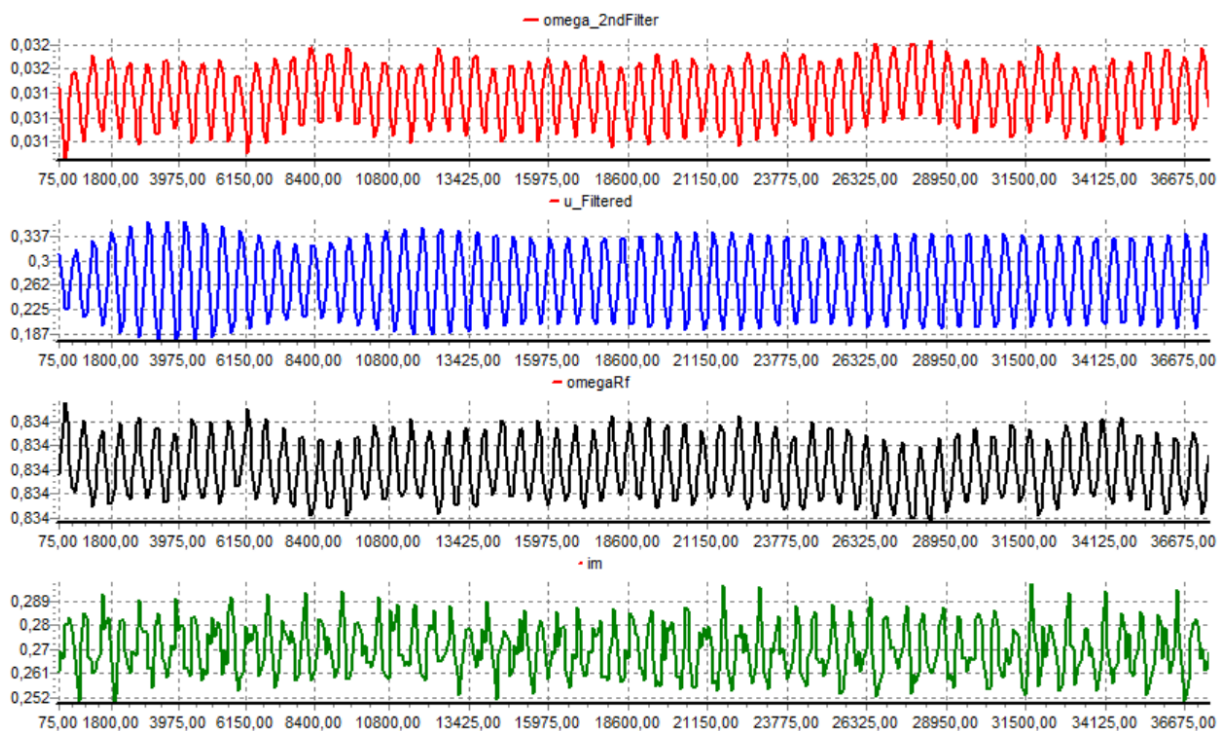
Rys. 29. Przebiegi zmiennych filtrowanych w adaptacyjnym filtrze detekcyjnym w stanie przejściowym.



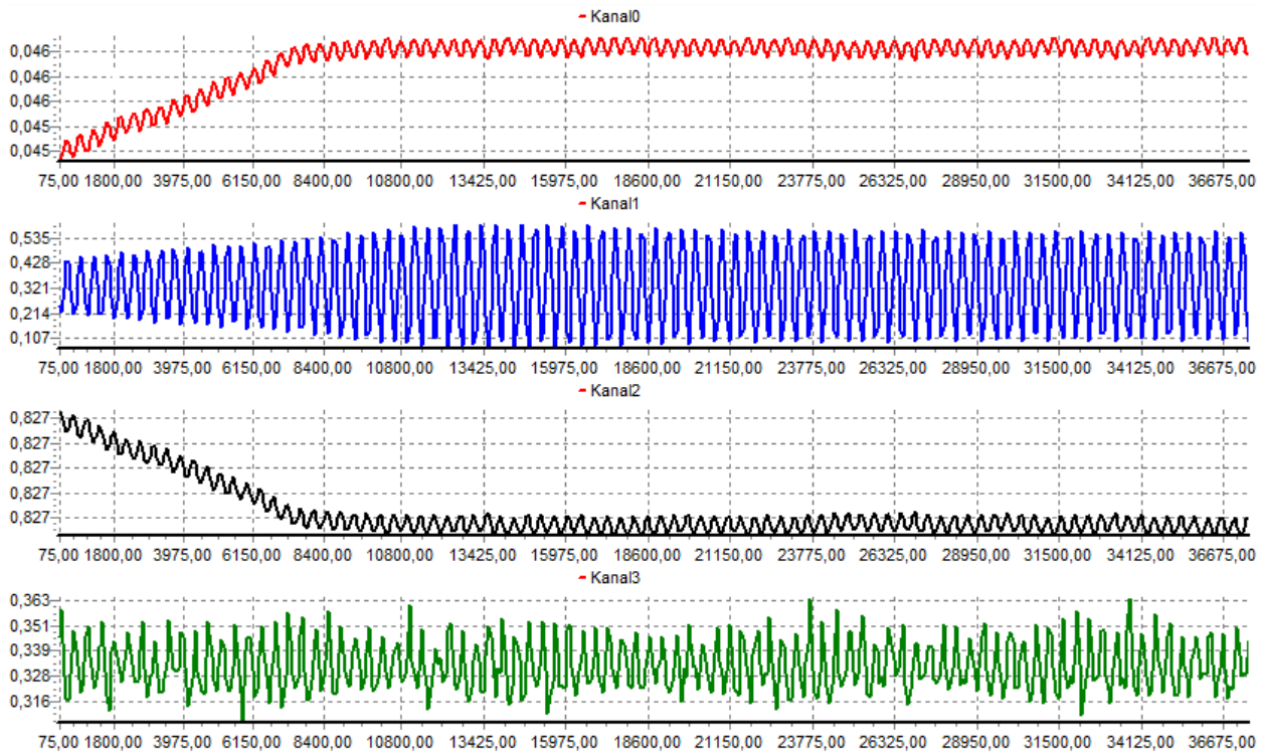
Rys. 30. Przebiegi zmiennych filtrowanych w adaptacyjnym filtrze detekcyjnym w stanie przy nieuszkodzonym wirniku dla niskiej wartości  $\xi$ .



Rys. 31. Przebiegi zmiennych filtrowanych w adaptacyjnym filtrze detekcyjnym w stanie przy uszkodzonym wirniku dla niskiej wartości  $\xi$ .



Rys. 32. Przebiegi zmiennych filtrowanych w adaptacyjnym filtrze detekcyjnym w stanie przy nieuszkodzonym wirniku dla wysokich wartości  $\xi$ .



Rys. 33. Przebiegi zmiennych filtrowanych w adaptacyjnym filtrze detekcyjnym w stanie przy uszkodzonym wirniku dla wysokich wartości  $\xi$  (opis zmiennych zgodnie z rys. 32)

Przeprowadzony cykl badań symulacyjnych i eksperymentalnych pozwolił na zweryfikowanie postawionej hipotezy badawczej i potwierdził korzystne właściwości metody diagnozowania w dziedzinie czasu dla uszkodzeń o częstotliwościach symptomów możliwych do deterministycznego wyznaczenia. Korzystne właściwości zaproponowanej metody diagnozowania pośrednio wynikają z dobrych właściwości układu sterowania multiskalarnego oraz dokładnej estymacji zmiennych stanu w obserwatorze, pozwalającej na precyzyjne wyznaczenie poślizgu, a następnie poszukiwanej częstotliwości składowej harmoniczej w badanej wielkości fizycznej.

Kolejne podjęte zagadnienie badawcze dotyczyło badania eksperymentalnego diagnozowania symptomów uszkodzenia wirnika w bezczujnikowym układzie napędowym z silnikiem klatkowym z obserwatorami typu backstepping. Struktura obserwatora dla badanego układu napędowego opisana w literaturze (M. Morawiec) została wykorzystana w procesach diagnozowania uszkodzenia wirnika:

$$\frac{d\hat{i}_s}{d\tau} = -\frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{L_r w_\sigma} \hat{i}_s + \frac{R_r L_m}{L_r w_\sigma} \hat{\psi}_r - j \frac{L_m}{w_\sigma} \hat{Z} + \frac{L_r}{w_\sigma} u_s + v,$$

$$\frac{d\hat{\psi}_r}{d\tau} = -\frac{R_r}{L_r} \hat{\psi}_r + \frac{R_r L_m}{L_r} \hat{i}_s + j \tilde{Z} (\gamma_1 - 1),$$

$$v = -\frac{R_r L_m}{L_r w_\sigma} \tilde{\psi}_r - \frac{L_m}{w_\sigma} \tilde{Z} - c_\alpha \tilde{i}_s - c_\beta z - \xi \tilde{\xi},$$

$$\gamma_1 = \frac{R_r w_\sigma}{L_r L_m} (c_\alpha + c_\beta)(c_\alpha c_\beta + 1),$$

$$\frac{d\tilde{\xi}}{d\tau} = \tilde{i}_s,$$

$$\tilde{i}_s = \hat{i}_s - i_s,$$

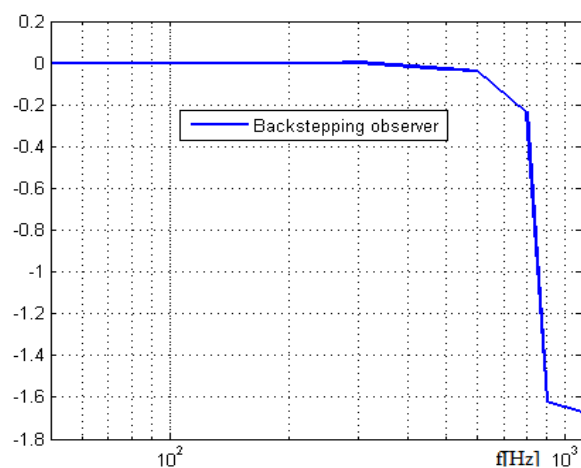
$$z = \tilde{i}_s + c \tilde{\xi},$$

$$\dot{z} = \frac{R_r L_m}{L_r w_\sigma} \tilde{\psi}_r - j \frac{L_m}{w_\sigma} \tilde{Z} + v + c_\alpha \tilde{i}_s,$$

$$\tilde{Z} = \hat{Z} - \hat{\omega}_r \hat{\psi}_r,$$

$$\hat{\omega}_r = \frac{\hat{Z}_\alpha \hat{\psi}_{r\alpha} + \hat{Z}_\beta \hat{\psi}_{r\beta}}{\hat{\psi}_{r\alpha}^2 + \hat{\psi}_{r\beta}^2}.$$

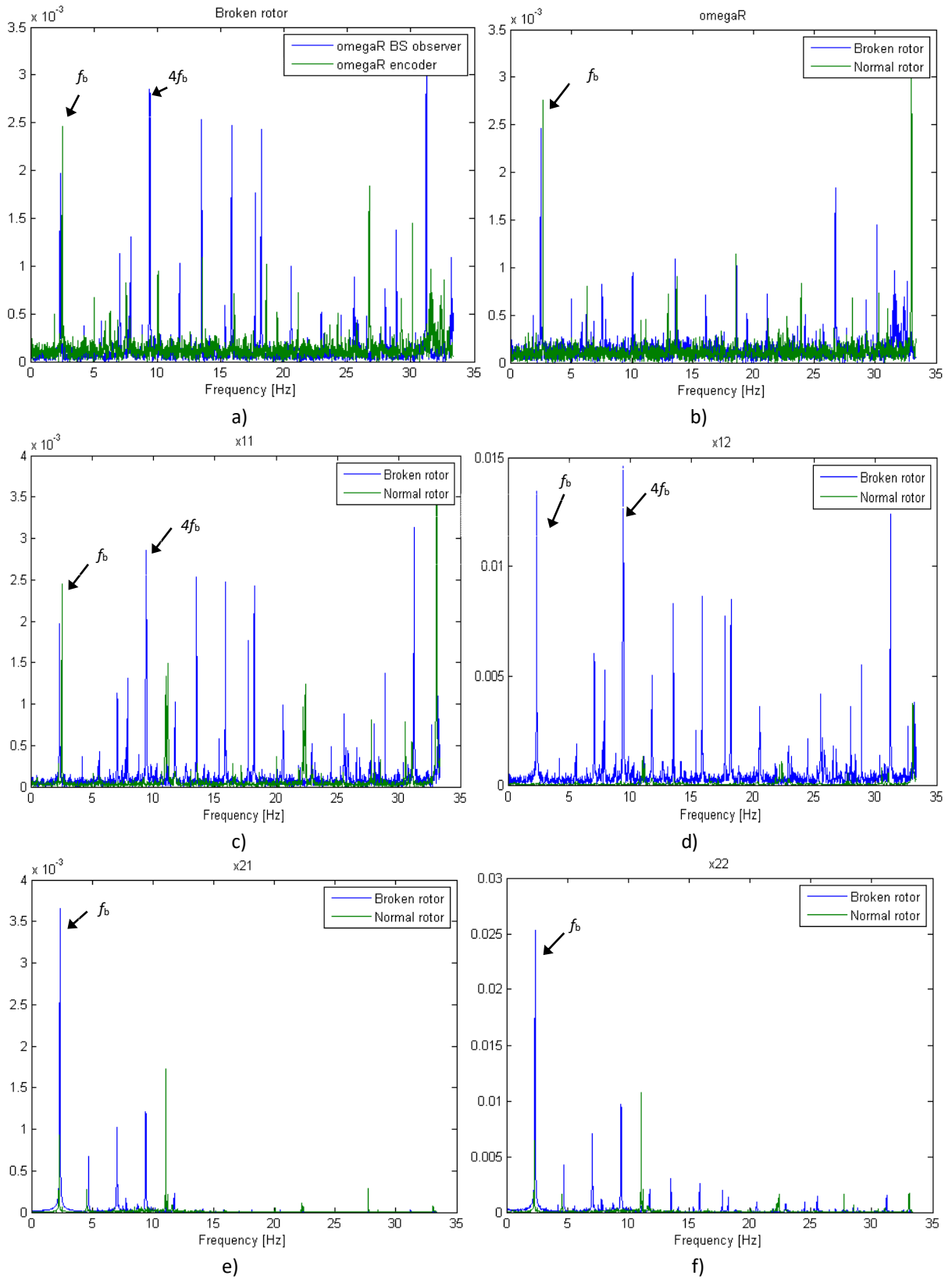
Na podstawie zidentyfikowanej symulacyjnie charakterystyki częstotliwościowej obserwatora

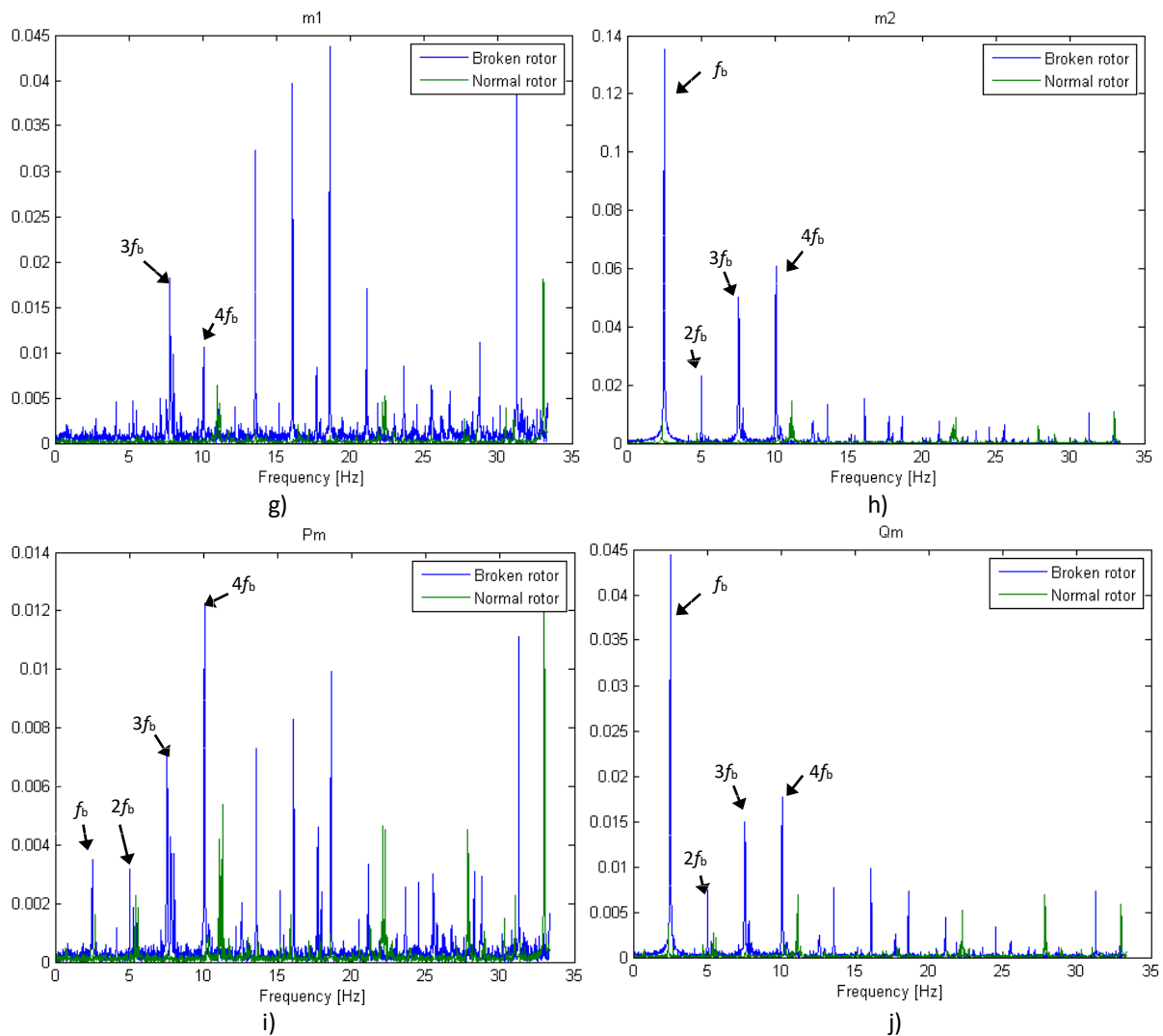


Rys. 33. Charakterystyka częstotliwościowa obserwatora backstepping.

postawiono hipotezę możliwości diagnozowania uszkodzeń w zakresie pasma przenoszenia obserwatora backstepping. Następnie w układzie sterowania bezczujnikowego, którego schemat jest zgodny z przedstawionym na rysunku 15 przeprowadzono badania eksperymentalne w układzie napędowym z silnikiem klatkowym SG 132-S4 5,5 kW,  $U_n=400$  [V],  $I_n=10,9$ [A],  $n_n=1450$ [obr./min.].

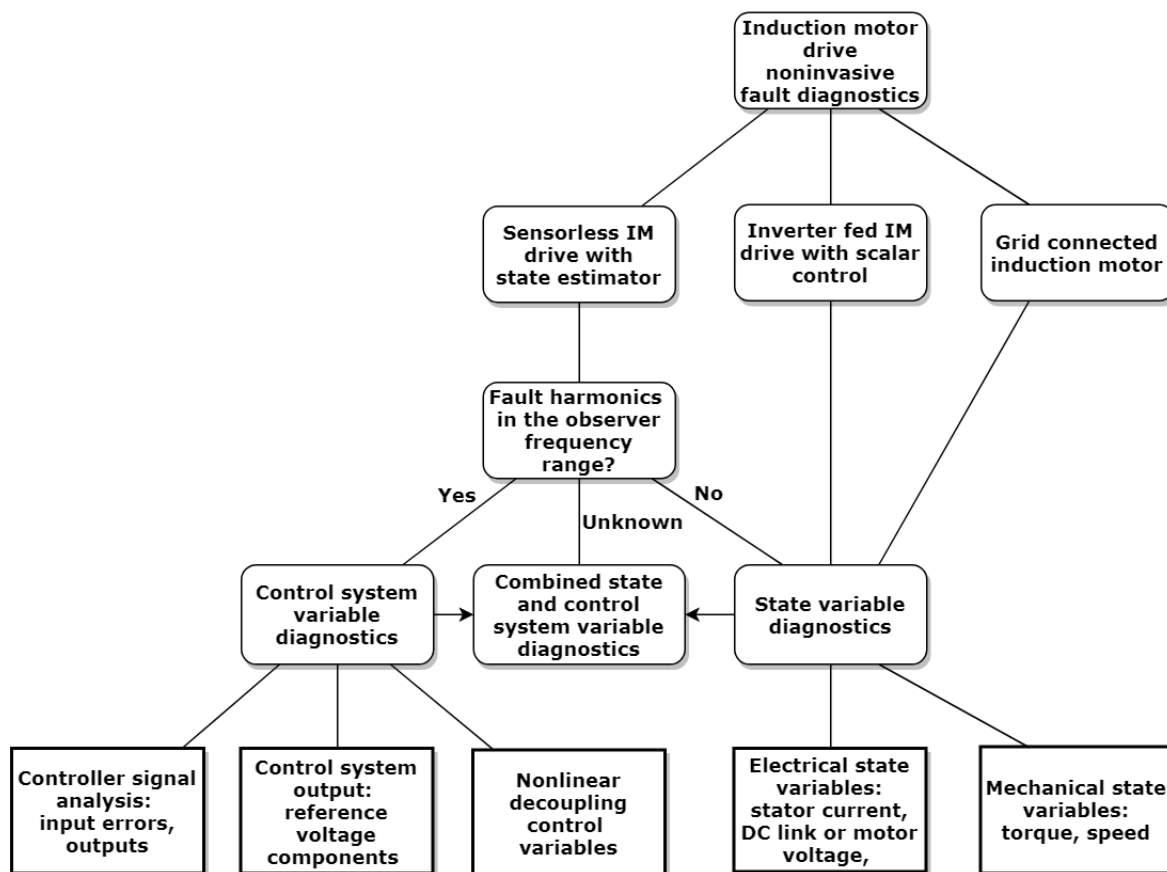






Rys. 34. Identyfikacja i porównanie symptomów uszkodzenia wirnika dla a) uszkodzonego wirnika przy pomiarze i estymacji prędkości kątowej oraz przy b) uszkodzonym i nieuszkodzonym wirniku przy b) pomiarze prędkości kątowej oraz w układzie bezczujnikowym w zmiennych multiskalarnych c)  $x_{11}$  d)  $x_{12}$  e)  $x_{21}$  f)  $x_{22}$ , w zmiennych sterowania linearyzującego g)  $m_1$  h)  $m_2$  i) mocy czynnej  $P_m$  i j) mocy biernej  $Q_m$ .

Wyniki badań eksperymentalnych obrazujące możliwości diagnozowania uszkodzenia wirnika w układzie bezczujnikowym z obserwatorem typu backstepping w zmiennych stanu oraz w zmiennych sterujących przedstawiono na rysunku 34, które potwierdziły występowanie także wielokrotności poszukiwanych składowych harmonicznnych związanych z uszkodzeniem (dla  $k > 1$ ) i korzystne właściwości struktury obserwatora backstepping w diagnozowaniu uszkodzeń w maszynie na przykładzie uszkodzenia wirnika.



Rys. 35. Proponowany wybór zmiennych diagnostycznych dla sterowania skalarnego i bezczujnikowego.

Na podstawie analizy przeprowadzonych badań diagnozowania uszkodzeń w układach sterowania skalarnego i bezczujnikowego zaproponowałem proces wyboru zmiennych diagnostycznych do diagnozowania układów napędowych o zmiennej prędkości kątowej wału z maszynami asynchronicznymi, umożliwiając wiarygodną ocenę zakresu uszkodzenia na podstawie zidentyfikowanej amplitudy odpowiedniej składowej harmonicznej. Metoda zdaniem autora znajduje zastosowanie także w układach napędowych z innymi maszynami elektrycznymi. Wybór zmiennych diagnostycznych jest złożonym zagadnieniem i zgodnie z propozycją uzależniony został od zakresu pasma przenoszenia estymatora zmiennych stanu w układzie bezczujnikowym jak pokazano na rysunku 35. Na podstawie znajomości charakterystyki częstotliwościowej estymatora zmiennych stanu oraz zakresu częstotliwości poszukiwanych składowych harmonicznych rekomendowany jest wybór zmiennych stanu maszyny i zmiennych układu sterowania. Uwzględniono także przypadek, w którym charakterystyka częstotliwościowa estymatora zmiennych stanu nie jest znana, w którym rekomendowane jest diagnozowanie z wykorzystaniem zarówno zmiennych stanu i zmiennych sterujących.

Praktyczny wymiar i zapotrzebowanie na efektywne metody diagnozowania pośrednio potwierdza liczba publikacji dotyczących metod diagnozowania, niemniej dla układów sterowanych bezczujnikowo jest ich niewiele, co zdaniem autora wynika z ograniczonej możliwości badania metodami analitycznymi, i co dalej przekłada się na konieczność opracowania złożonych modeli

symulacyjnych uwzględniających elementy układu sterowania, zasilania, maszyny oraz uszkodzenia. Złożoność problematyki wynika z konieczności uwzględnienia oddziaływania układu regulacji, do którego określenia zaproponowano badanie charakterystyk częstotliwościowych regulatorów i zastosowanego w syntezie bezczujnikowego układu sterowania estymatora zmiennych stanu. Analiza znanych metod diagnozowania stanowi zdaniem autora wysoką barierę podjęcia tematyki badawczej ze względu na potrzebę analizy oddziaływania na maszynę asynchroniczną topologii układu regulacji, estymatora zmiennych stanu który ściśle związany jest z ich parametrami i wzmocnieniami. Przeprowadzono analizę zgromadzonej literatury, w której liczba przeanalizowanych artykułów związanych z diagnostyką układu napędowych przekracza 1000 publikacji recenzowanych bez monografii oraz rozpraw doktorskich, z których jedynie 14 dotyczy tematyki układów napędowych z układem regulacji (w tym układów bezczujnikowych). Przeprowadzenie opisanego zakresu badań nie byłoby możliwe bez wieloletniego rozwijania przez Zespół Badawczy Katedry Automatyki Napędu i Konwersji Energii bazy laboratoryjnej bezczujnikowych układów napędowych oraz wypracowanego dorobku naukowego.

## Podsumowanie

Do ważniejszych osiągnięć autor wniosku zalicza:

- Opracowanie własnego zestawu narzędzi symulacyjnych w oparciu o szczegółowe modele matematyczne do modelowania układów napędowych z maszynami asynchronicznymi obejmujących:
  - modele obwodowe maszyn asynchronicznych klatkowych i pierścieniowych
  - modele obwodowe uszkodzeń do modelowania symulacyjnego przzerwania prętów, pierścieni połączeń czołowych czy zmianę rezystancji prętów i innych parametrów obwodowych zastępczego modelu wirnika oparte o zaproponowaną własną metodykę z wykorzystaniem wektorów przestrzennych rozszerzonych o składową zerową i transformacji układów współrzędnych Clark i Parka.
  - opracowanie modelu maszyny i uszkodzenia wirnika z wykorzystaniem modeli obwodowych opartych na funkcjonatach koenergii Lagrange'a oraz dysypacji Rayleigh'a (Wilk, Kostro).
  - wektorowe, w tym multiskalarne, modele maszyn asynchronicznych dla wybranych kombinacji par zmiennych stanu maszyny [Is, Fr; Is Ir; Fs Fr], których wybór zależy od dostępności pomiarowej zmiennych stanu, względem których wyznaczane są prawa strony równań różniczkowych i których przyjęcie wpływa na właściwości układu sterowania.
  - układy sterowania skalarnego, wektorowe – multiskalarne i zorientowane polowo,
  - modele estymatorów zmiennych stanu – obserwatory Luenbergera, Kuboty, 3 kluczowe topologie obserwatorów prof. Krzezińskiego oraz zmodyfikowane topologie do pracy w zakresie osłabiania pola (Adamowicz), estymatory MRAS, w tym zaproponowany obserwator MRAS<sup>CC</sup> (Dybkowski),
  - układy sterowania bezczujnikowego tworzone poprzez integracje powyższych elementów w układzie napędowym,
  - modulatory wektorowe opracowane w Katedrze Automatyki Napędu Elektrycznego i Konwersji Energii Politechniki Gdańskiej,

- transformacje układów współrzędnych w formie przełączników do zaproponowanej metodyki diagnozowania z wykorzystaniem wirujących układów współrzędnych,
  - modele do analizy wrażliwości bezczujnikowych układów regulacji na uszkodzenia w maszynie.
- Zidentyfikowanie i potwierdzenie eksperymentalne zjawiska chwilowej utraty stabilności bezczujnikowego układu sterowania o charakterze okresowym przy znacznym zakresie uszkodzenia wirnika wynikające z założenia symetrii w syntezie układu sterowania i estymatorów zmiennych stanu, z doboru wzmocnień regulatorów, a także z zakresu stabilności obserwatora wynikającego z położenia biegunów związanych z doбором wzmocnień uchybów estymowanych zmiennych.
  - Zidentyfikowanie i potwierdzenie eksperymentalne zjawiska oscylacyjnej zmienności amplitud harmonicznym związanych z uszkodzeniem wirnika w bezczujnikowym układzie napędowy m oraz zaproponowanie metody diagnozowania ograniczającej wpływ tego zjawiska.
  - Zaproponowanie, przebadanie symulacyjne i eksperymentalne dla maszyny asynchronicznej zasilanej z przekształtnika metody diagnozowania asymetrii wirnika z wykorzystaniem wymuszenia pola pulsującego w maszynie poprzez niesymetryczne zasilanie, która nie wymaga obciążenia silnika, zablokowania wirnika, wymuszenia poślizgu, modyfikacji połączenia układu zasilania ani demontażu wirnika i może być stosowana niezależnie od sposobu pomiaru lub estymacji prędkości kątowej wału w układzie regulacji.
  - Opracowanie i przebadanie modelu polowego z wykorzystaniem narzędzia FEMM zjawiska uszkodzenia wirnika w silniku klatkowym, w którym uwzględniono także obrót wirnika względem stojana; badano Rozkład gęstości prądu, magnetycznego potencjału wektorowego oraz indukcji magnetycznej.
  - Opracowanie pełnego modelu symulacyjnego elektrowni wiatrowej z maszyną dwustronnie zasilaną z multiskalarnym układem sterowania z zadawaniem mocy czynnej i biernej, uwzględniającego filtry wyjściowe, transformator 690V/15kV, model linii kablowej oraz wartości napięcie i moc mierzone w punkcie przyłączenia elektrowni do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.
  - Przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych wrażliwości skalarnych, wektorowych i bezczujnikowych układów sterowania na obecność uszkodzenia wirnika z wykorzystaniem obserwatora prof. Krzemińskiego dla układu bezczujnikowego oraz wpływu obecności uszkodzenia na dokładność estymowanych zmiennych stanu maszyny i sformułowanie wniosków rozszerzonych dla innych rodzajów uszkodzeń.
  - Przeprowadzenie rozszerzonych badań eksperymentalnych zjawiska uszkodzenia wirnika w bezczujnikowym układzie sterowania z wykorzystaniem analizy harmonicznym prądu fazowego stojana oraz zaawansowanego oscyloskopu cyfrowego i sondy o niskiej pojemności.
  - Paproponowanie, przebadanie symulacyjne i eksperymentalne metodyki diagnozowania silnika klatkowego z wykorzystaniem wirujących układów współrzędnych na przykładzie uszkodzenia wirnika, w której układ współrzędnych jest sprowadzany do układu wirującego zgodnie z częstotliwością sygnału uszkodzenia, a następnie w procesie filtracji cyfrowej izolowana jest składowa stała.

- Zaproponowanie bezinwazyjnej, efektywnej obliczeniowo metodyki diagnozowania uszkodzeń w czasie rzeczywistym w dziedzinie częstotliwości oraz implementację algorytmów diagnozowania w sterowniku mikroprocesorowym na przykładzie uszkodzenia wirnika i przeprowadzenie cyklu badań symulacyjnych i eksperymentalnych w celu ich weryfikacji.
- Zaproponowanie i zweryfikowanie eksperymentalne metodyki diagnozowania uszkodzeń w układzie mikroprocesorowym poprzez bezpośrednie wyznaczanie składowych harmonicznym związanych z uszkodzeniami w układach sterowania skalarnego, wektorowego oraz bezczujnikowego, których częstotliwości są już estymowane z wykorzystaniem estymatorów zmiennych stanu do pełnej identyfikacji maszyny w układzie sterowania, uzyskując istotne zmniejszenie liczby niezbędnych operacji matematycznych, a przez skrócenie czasu procesów diagnozowania, co jest istotne zarówno dla ochrony układu napędowego jak i możliwości implementacji sterowania tolerującego uszkodzenia.
- Przeprowadzenie cyklu badań symulacyjnych i eksperymentalnych zaproponowanej bezinwazyjnej metodyki diagnozowania uszkodzeń w czasie rzeczywistym układu napędowego w dziedzinie czasu na przykładzie uszkodzenia wirnika z wykorzystaniem technik filtracji cyfrowej, tj. filtru pasmowo-przepustowego wzmacniającego składową sygnału pomiarowego związaną z wybranym uszkodzeniem.
- Weryfikację eksperymentalną diagnozowania uszkodzenia wirnika w bezczujnikowym układzie napędowym z obserwatorem typu backstepping w zakresie wszystkich mierzonych i estymowanych wielkości fizycznych, tj. mechanicznych i elektromagnetycznych zmiennych stanu maszyny i zmiennych układu sterowania z uwzględnieniem zmiennych linearyzujących, dla różnych parametrów pomiarowych rejestracji w układzie mikroprocesorowym w celu określenia wymagań dla diagnozowania składowych o niskich częstotliwościach związanych z poszukiwaniem kompromisu pomiędzy rozdzielczością widma a czasem rejestracji,
- Zaproponowanie metodyki diagnozowania układów napędowych z maszynami asynchronicznymi związanej z wymaganiami wyboru odpowiednich zmiennych stanu lub sterujących do diagnozowania uszkodzeń, z uwzględnieniem przypadku znanej i nieznannej charakterystyki częstotliwościowej estymatora zmiennych stanu w układach bezczujnikowych.
- Opracowanie ekspertyz związanych z diagnozowaniem stanu technicznego układów napędowych elektrowni wiatrowych dla Sądów Okręgowych w Polsce w charakterze biegłego sądowego,
- Ekspertyza dla Operatora Sieci Dystrybucyjnej oraz liczne prace projektowe dla Inwestorów związane z realizacją projektów elektrowni wiatrowych.