

dr inż. Jacek Rezmer

Wrocław, 23 czerwca 2012 r.

**AUTOREFERAT**  
**przedstawiający dorobek i osiągnięcia naukowe**

**Życiorys naukowy**

**Dane osobowe:**

Imię i nazwisko: Jacek Rezmer  
Data urodzenia:  
Adres domowy:

**Wykształcenie:**

dr inż. 25 września 1995  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektryczny  
Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii  
Pl. Grunwaldzki 13, 50-370 Wrocław  
Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika  
Specjalność: Elektrotechnika Teoretyczna  
Tytuł pracy: „Cyfrowe wyznaczanie częstotliwości składowej podstawowej w czasie rzeczywistym”

mgr inż. 30 czerwca 1987  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektryczny  
Instytut Energoelektryki  
Pl. Grunwaldzki 13, 50-370 Wrocław  
Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika  
Specjalność: Automatyka stosowana  
Tytuł pracy: „Cyfrowe zabezpieczenie przeciążeniowe elektrycznych silników indukcyjnych”

**Zatrudnienie:** Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektryczny  
Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii  
Zakład Elektrotechniki Teoretycznej  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław  
tel. (071) 320 26 25,  
fax (071) 320 20 06,  
email: jacek.rezmer@pwr.wroc.pl

**Doświadczenie  
zawodowe:**

Adiunkt od 1996 (aktualnie)  
pracownik naukowo-dydaktyczny  
Politechnika Wroclawska  
Wydział Elektryczny, Zakład Elektrotechniki Teoretycznej  
Pl. Grunwaldzki 13, 50-370 Wrocław

Asystent 1987-1996  
pracownik naukowo-dydaktyczny  
Politechnika Wroclawska  
Wydział Elektryczny, Zakład Elektrotechniki Teoretycznej  
Pl. Grunwaldzki 13, 50-370 Wrocław

**Pełnione funkcje:**

od 2011 (aktualnie)  
Kierownik Zakładu Elektrotechniki Teoretycznej

2009-2011  
p.o. Kierownika Zakład Elektrotechniki Teoretycznej

od 2012 (aktualnie)  
Kierownik Międzyinstytutowego Laboratorium Systemów  
Energetyki Odnawialnej Wydziału Elektrycznego

2008 - 2012  
Kierownik Laboratorium Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów

**Dorobek i osiągnięcia naukowe**Przed doktoratem

W trakcie pracy na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w latach 1987-1995 prowadziłem badania naukowe w zakresie cyfrowego przetwarzania sygnałów do zastosowań w elektrotechnice. W tamtym okresie była to tematyka nowatorska i dynamicznie rozwijająca się. Moim szczególnym obszarem zainteresowań były algorytmy pomiarowe wielkości elektrycznych oraz filtracja cyfrowa.

Rezultaty tych badań stanowiły podstawę opracowania rozprawy doktorskiej. W roku 1995 uzyskałem stopień doktora nauk technicznych broniąc pracę p.t. „*Cyfrowe wyznaczenie częstotliwości podstawowej składowej sygnałów w czasie rzeczywistym*” [89]. Promotorem pracy doktorskiej był prof. dr hab. inż. Tadeusz Łobos (Politechnika Wroclawska), a recenzowali ją: doc. dr hab. Ewa Lipowska-Nadolska (PAN) oraz dr hab. inż. Janusz Szafran (Politechnika Wroclawska). Rozprawa doktorska dotyczyła cyfrowych metod pomiaru częstotliwości sygnału przemiennego i zawierał szczegółową analizę szeregu metod i algorytmów prezentowanych w literaturze. Prowadzone testy symulacyjne pozwoliły na ocenę algorytmów i wskazanie obszarów ich możliwych zastosowań. Głównym osiągnięciem

badania było opracowanie nowej, dokładniejszej metody pomiaru częstotliwości opartej o model estymacyjny Prony'ego pierwszego rzędu oraz filtrację cyfrową. Proponowane rozwiązanie było prezentowane na konferencjach naukowych oraz opublikowane w czasopiśmie IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement [11]. Wnioski wynikające z dyskusji konferencyjnych potwierdziły potrzebę badań nad nowymi metodami pomiarów cyfrowych. Wskazywały też na znaczny potencjał metod parametrycznych, w tym modelu Prony'ego, do wyznaczania parametrów systemów elektrycznych, szczególnie w warunkach zakłóceń i w stanach przejściowych. Duże zainteresowanie metodą, o czym świadczy liczba cytowań, stanowiło zachętę do dalszych badań w tym zakresie.

### Po doktoracie

Od roku 1995, po uzyskaniu stopnia doktora, kontynuowałem badania nad zastosowaniem algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów w elektrotechnice, poszerzając obszar zainteresowań o nowe metody analizy oraz narzędzia pozwalające na praktyczną implementację opracowywanych algorytmów. Do metod tych należały głównie: analiza spektralna sygnałów, metody dekompozycji oraz algorytmy ewolucyjne. Badania w szczególności związane były z zagadnieniami pracy systemów elektroenergetycznych w stanach przejściowych oraz z problemami jakości energii elektrycznej.

W latach 1996-2012, w ramach grantów finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego: *Cyfrowa filtracja sygnałów z wykorzystaniem statystyk wyższych rzędów* (1996-1998), *Nowe metody analizy sygnałów elektrycznych z zastosowaniem przekształcenia falkowego* (1999-2001), *Nowe metody analizy niestacjonarnych sygnałów elektrycznych* (2002-2005), *Nowe metody analizy i oceny jakości energii elektrycznej* (2006-2009), *Rozdzielcze sieci elektroenergetyczne z rozproszoną generacją energii* (2007-2010), *Nowe algorytmy przetwarzania sygnałów oraz globalne wskaźniki jakości energii w ocenie stanów pracy sieci z generacją rozproszoną* (2011-2014), moje badania skupiały się na zagadnieniach związanych z ich tematami.

W okresie od 1996 do 1998 roku, w ramach projektu europejskiego TEMPUS, w Zakładzie Elektrotechniki Teoretycznej uruchomiono Laboratorium Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów. Biorąc czynny udział w opracowaniu koncepcji Laboratorium i jego budowie, moje prace badawcze kierowane były również w stronę metod numerycznych związanych z symulowaniem układów elektroenergetycznych, praktycznego zastosowania procesorów sygnałowych i informatycznych systemów czasu rzeczywistego oraz tematów dotyczących sieci teleinformatycznych. Głównym celem twórców Laboratorium było otwarcie możliwości badawczych poprzez realizacje sprzętowe dla opracowywanych metod przetwarzania sygnałów na potrzeby elektroenergetyki. W obszarze moich badań znalazły się między innymi takie zagadnienia jak: stany zakłóceń w liniach przesyłowych, awaryjna praca przekształtników, diagnostyka maszyn i urządzeń elektrycznych, analizy stanów przejściowych pracy systemów energetycznych, włączając także zagadnienia jakości energii i pracy obiektów generacji rozproszonej. W tym czasie poszerzyłem także ofertę dydaktyczną na kierunku Automatyka i Robotyka o kurs „Cyfrowe przetwarzanie sygnałów”, umożliwiającą studentom nie tylko poznanie teorii, ale również realizację sprzętową wykładanych zagadnień teoretycznych. Prowadzone badania pozwalały na uaktualnianie zagadnień kursu oraz proponowanie nowych tematów w ramach zajęć projektowych i prac dyplomowych.

W roku 1997 odbyłem trzymiesięczny staż naukowy na Uniwersytecie Erlangen-Nürnberg poświęcony głównie studiom literaturowym w zakresie nowych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów. Kontynuowałem też prace związane z metodami pomiaru częstotliwości sygnałów zniekształconych, optymalizując dobór parametrów metody.

Algorytmy oparte o modyfikowany model Prony'ego zapewniały dużą dokładność i szybkość obliczeniową, przy poziomie zniekształceń napięcia spotykanym w elektroenergetyce. Badałem także dynamiczne własności metody do szybkiego śledzenia zmian częstotliwości w czasie rzeczywistym. Odpowiedni dobór parametrów zapewniał większą odporność obliczeniową na obecność szumu. Wyniki prowadzonych w tym czasie badań były prezentowane na zagranicznych konferencjach naukowych [81,82,83].

W latach 1999-2001 moje badania skupiły się na wykorzystaniu transformacji falkowych (Wavelet Transform) do analizy zwarć w liniach elektroenergetycznych. Badania wykazały, że zastosowanie falek zespolonych, zamiast dotąd stosowanego przekształcenia Fouriera, do wyznaczania trajektorii zmian impedancji linii w czasie zwarcia, ma lepsze właściwości ze względu na monotoniczność obliczanej krzywej. Pozwalało to wykorzystać przekształcenie falkowe do szybkiego algorytmu zabezpieczenia odległościowego wprowadzając także elementy predykcji przebiegu krzywej impedancji. W publikacji [10] oraz na konferencjach naukowych [71,78,80] przedstawiono wyniki obszernych badań symulacyjnych oraz przeprowadzono analizę jakościową metody w zależności od typu stosowanych falek i ich parametrów.

Równoległe prowadziłem badania nad możliwością zastosowania modelu Prony'ego wysokiego rzędu oraz transformacji falkowej do wyznaczania parametrów składowych przejściowych sygnałów elektrycznych. Badania dotyczyły głównie układów elektroenergetycznych z przełączanymi bateriami kondensatorów oraz systemów podczas zwarć doziemnych w liniach najwyższych napięć. Obliczenia numeryczne pozwalały na optymalizację wyboru falek oraz ich parametrów, do wykrywania chwili wystąpienia stanu przejściowego, towarzyszącego przełączaniu baterii kondensatorów oraz do wykrywania chwil wystąpienia zwarcia w linii. Transformacje falkowe wykorzystano także do wyznaczania charakterystyk czasowo-częstotliwościowych sygnałów niestacjonarnych. Wyniki prowadzonych prac prezentowano na konferencjach [74,76,79] oraz opublikowano w czasopiśmie [22].

Od roku 2001 moje badania skupiały się na opracowaniach nowych, dokładniejszych metod do analizy sygnałów niestacjonarnych. Postępujący rozwój energoelektroniki powodował nowe zjawiska w systemie elektroenergetycznym. Badania prowadziłem bazując na szerokiej gamie niestacjonarnych przypadków, wśród których znalazły się przebiegi zarejestrowane w dynamicznym modelu układu elektroenergetycznego oraz w warunkach rzeczywistych, sygnały napięć i prądów zarejestrowane w rzeczywistym układzie zasilania pieca łukowego oraz przebiegi napięć i prądów układów przekształtnikowych w różnych stanach pracy.

Opracowane metody wykazywały poprawę dokładności przy wyznaczaniu parametrów w dziedzinie czasu i dziedzinie częstotliwości, w porównaniu do wyników uzyskiwanych dotąd stosowaną analizą Fouriera. Zastosowanie zaproponowanych metod pozwoliło między innymi na wykrycie wahań charakterystycznych harmonicznych oraz chwilowych niecharakterystycznych harmonicznych, występujących w sygnałach zasilania pieca łukowego oraz podczas zwarć w układzie przekształtnikowym, zasilającym maszynę asynchroniczną.

Efekt wysokiej rozdzielczości, charakterystyczny dla metod parametrycznych (należy do nich model Prony'ego), okazał się szczególnie użyteczny w wyznaczaniu częstotliwości zniekształconych sygnałów w układach przekształtnikowych, przy identyfikacji stanu asynchronicznego maszyn synchronicznych oraz w wykrywaniu podharmonicznych zawartych w sygnale sieci trakcyjnej. Algorytmy oparte na wysokorozdzielczych metodach parametrycznych zaproponowano zastosować w obszarach detekcji składowych, których częstotliwości różnią się bardzo niewiele.

Badania prowadziłem przy współpracy z Uniwersytetem Technicznym w Dreźnie oraz Uniwersytetem Technicznym w Neapolu. Efekty realizacji projektu prezentowane były na licznych konferencjach naukowych krajowych i zagranicznych oraz publikowane w IEEE Transaction on Industrial Electronics i Wiadomościach Elektrotechnicznych [9, 20]

W latach 2006-2010 skupiłem się głównie na zagadnieniach oceny jakości energii elektrycznej. Energia o odpowiedniej jakości jest współcześnie jednym z najważniejszych tematów zarówno dla wytwórców energii, konsumentów energii, jak i producentów urządzeń elektrycznych. Głównym celem badań było opracowanie, w oparciu o nowoczesne metody matematyczne, nowych, dokładniejszych od dotychczasowych, algorytmów analizy jakości oraz zbadanie możliwości ich zastosowania do rozwiązania problemu kompleksowej oceny wpływu nieliniowych odbiorników elektroenergetycznych na jakość energii elektrycznej.

Badania prowadziłem z wykorzystaniem własnych programów obliczeniowych, skryptów i symulacji tworzonych w środowisku MATLAB (Power System Toolbox) oraz w programie EMTP (Electromagnetic Transient Programm), a także korzystając z przebiegów zarejestrowanych w warunkach rzeczywistych. Laboratorium Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów wyposażone zostało w mobilne analizatory jakości energii, co umożliwiło badania w obiektach przemysłowych.

W ramach współpracy z Uniwersytetem Carlosa III w Madrycie, badania podjęły dodatkowo problematykę generacji rozproszonej w elektroenergetyce. Jest to obecnie jeden z priorytetów badawczych finansowanych przez Unię Europejską w ramach rozwoju zrównoważonego energetyki. Obok licznych zalet tego typu generacji, jej główną wadą jest niekorzystny wpływ na jakość energii elektrycznej.

Badania skupiły się na analizie stanów przejściowych w systemach z generacją wiatrową. Prowadzone symulacje oraz analizy, w oparciu o nowe metody przetwarzania sygnałów, dotyczyły zagadnień szybkiego i pewnego wyznaczenia parametrów zapadów napięcia przy wykorzystaniu przekształcenia falkowego (analiza wielorozdzielcza) [3,5], wyznaczania parametrów składowych przejściowych sygnałów w oparciu o model Prony'ego [4,6] oraz metod ewolucyjnych (algorytmy genetyczne) do wyznaczania parametrów sygnałów mocno zniekształconych [2,7].

Rok 2011 to początek współpracy z Centrum Badawczym ABB. Wcześniejsze doświadczenia związane z wykorzystaniem estymacyjnego modelu Prony'ego oraz programowania ewolucyjnego pozwalają na komercjalizację wyników prowadzonych badań. Badania mają charakter innowacyjny i będą opublikowane dopiero po zgłoszeniu patentów.

W tym samym roku ze środków Funduszu Nauki i Technologii Polskiej Wydział Elektryczny przystąpił do budowy Międzyinstytutowego Laboratorium Systemów Energetyki Odnawialnej, w którego skład weszło Fotowoltaiczne Stanowisko Badawcze. Uczestniczyłem w pracach koncepcyjnych oraz całym procesie budowy stanowiska. Możliwości badawcze obejmują takie dziedziny jak: analiza jakości energii, pomiar i transmisja danych w sieciach inteligentnych, analiza efektywności źródeł, aspekty technologiczne, wpływ źródeł na system elektroenergetyczny oraz wiele innych. W grudniu 2011 roku zostałem powołany przez Dziekana Wydziału Elektrycznego na stanowisko kierownika laboratorium międzyinstytutowego.

Aktualnie kieruję badaniami związanymi z projektem finansowanym ze środków Narodowego Centrum Nauki, przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST8/02515. Projekt pt „*Nowe algorytmy przetwarzania sygnałów oraz globalne wskaźniki jakości energii w ocenie stanów pracy sieci z generacją rozproszoną*” jest realizowany od 2011r. Celem projektu jest opracowanie metod oceny zakłóceń oraz globalnych wskaźników jakości energii dedykowanych monitoringowi pracy sieci elektroenergetycznych z udziałem generacji rozproszonej. Zakłada się wykorzystanie nowoczesnych technik przetwarzania sygnałów oraz rozszerzenie definicji wskaźników

jakości energii. Aplikację oraz weryfikację opracowanych metod przewiduje się wykonać na podstawie rzeczywistych danych pochodzących z systemu monitoringu składającego się z zainstalowanych w sieci energetycznej rejestratorów oraz z centrum analiz wykorzystujących agregowane dane pomiarowe i nowo opracowane algorytmy

### Osiągnięcie habilitanta (jednotematyczny cykl publikacji):

Osiągnięciem habilitanta stanowiącym podstawę wniosku habilitacyjnego, określonym w art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw (DZ.U.nr 84, poz. 455) jest jednotematyczny cykl publikacji nt.: „**Zastosowania modelu estymacyjnego Prony’ego do analizy sygnałów w elektrotechnice**”. Cykl składa się z sześciu publikacji w czasopiśmie zarejestrowanych w bazie JCR [1,4,5,6,8,9]\*, trzech prac opublikowanych w innych czasopiśmie i prezentowanych na konferencjach naukowych[17,23,66]\*  
\*(numeracja wg Załącznika 3 „WYKAZ OPUBLIKOWANYCH PRAC NAUKOWYCH”)

#### Publikacje w czasopiśmie zarejestrowanych w bazie JCR

	UP <sup>1</sup>	LC <sup>2</sup>	IF <sup>3</sup>
1 Rezmer Jacek. Leonowicz Zbigniew. Gońo Radomir. <i>Analysis of distorted waveforms in power converter systems</i> . Przegląd Elektrotechniczny. 2011, R. 87, nr 1, s. 254-257	50%	0	0,204
4 Łobos Tadeusz. Hejke Igor. Rezmer Jacek. Sikorski Tomasz. Kostyła Paweł. <i>Parametric algorithms for frequency estimation in PWM converter systems</i> . Electric Power Systems Research. 2009, vol. 79, nr 11, s. 1568-1573	20%	1	1,259
5 Łobos Tadeusz. Rezmer Jacek. Janik Przemysław. Amaris Hortensia. Alonso Monica. Alvarez C. <i>Application of wavelets and Prony method for disturbance detection in fixed speed wind farms</i> . International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2009, vol 31, nr 9, s. 429-436	20%	8	1,613
6 Bracale Antonio. Carpinelli Guido. Leonowicz Zbigniew. Łobos Tadeusz. Rezmer Jacek. <i>Measurement of IEC groups and subgroups using advanced spectrum estimation methods</i> . IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2008, Vol. 57, nr 4, s. 672-681	20%	24	0,978
8 Łobos Tadeusz. Leonowicz Zbigniew. Rezmer Jacek. Schegner Peter. <i>High resolution spectrum - estimation methods for signal analysis in power systems</i> . IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2006, vol. 55, nr 1, s. 219-225	50%	52	0,572
9 Leonowicz Zbigniew. Łobos Tadeusz. Rezmer Jacek. <i>Advanced spectrum estimation methods for signal analysis in power electronics</i> . IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2003 vol. 50, nr 3, s. 514-519	33%	72	0,816

<sup>1</sup> Udział Procentowy, uzgodniony ze współautorami publikacji

<sup>2</sup> Liczba Cytowań - Ośrodek Inf. Naukowo Technicznej Politechniki Wrocławskiej, SciVerse

<sup>3</sup> Impact Factor - w roku publikacji

Publikacje w innych czasopismach i referaty konferencyjne

		UP	LC
17	Rezmer Jacek. Janik Przemysław. Łobos Tadeusz. Waclawek Zbigniew. Thiringer Torbjorn. <i>Estimation of transients' parameters in wind converter systems using advanced signal processing algorithms.</i> Przegląd Elektrotechniczny. Konferencje. 2007 R. 5, nr 2, s. 61-64	20%	0
23	Rezmer Jacek. Sikorski Tomasz. <i>Signal processing method for faults location in DC transmission system.</i> 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 8-11 May 2011, IEEE, cop. 2011. s. 1225-1228	50%	0
66	Łobos Tadeusz. Rezmer Jacek. Koglin Hans Jurgen. <i>Analysis of power system transient using wavelets and Prony method.</i> 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings, Porto, Portugal, September 10th-13th 2001. Vol. 4. Ed. J.T. Saraiva, M.A. Matos. Piscataway, IEEE, cop. 2001	33%	15

**Omówienie osiągnięcia w postaci jednotematycznego cyklu publikacji**

Wybrany jednotematyczny cykl publikacji jest częścią badań prowadzonych przeze mnie w dziedzinie zastosowań nowoczesnych metod matematycznych i cyfrowego przetwarzania sygnałów w elektrotechnice. Przedstawione prace dotyczą wykorzystania estymacyjnego modelu Prony'ego do analizy stanu systemu elektroenergetycznego. Wiąże się one zarówno z analizą pracy systemu w różnych warunkach, jak i z zagadnieniami jakości energii elektrycznej.

Rozwój energoelektroniki w ostatnich latach spowodował, że w systemach elektroenergetycznych wykorzystuje się w dużej mierze układy nieliniowe, które są źródłem wielu zakłóceń. Źródłem harmonicznych (także sub- i interharmonicznych) w systemie mogą być m.in.: przekształtniki, kompensatory mocy biernej, maszyny indukcyjne. Wpływ tych urządzeń na system elektroenergetyczny może obejmować, oprócz efektów cieplnych, drgania maszyn, przeciążanie filtrów, interferencje z urządzeniami telekomunikacyjnymi i wiele innych, co powoduje zwiększenie strat i obniżenie niezawodności systemu. Ponadto, w stanach awaryjnych urządzeń, a także w stanach normalnych regulowanych napędów przekształtnikowych, występują przebiegi napięć i prądów mające charakter niestacjonarny.

Prawidłowa identyfikacja i estymacja parametrów napięć i prądów pozwala podjąć próbę eliminacji niekorzystnych zjawisk w systemach elektrycznych.

Ważnym zagadnieniem stało się opracowywanie i implementacja nowych, skutecznych cyfrowych metod analizy niepożądanych zdarzeń. Należą do nich metody oparte na modelu estymacyjnym Prony'ego.

Badania zapoczątkowane podczas prac nad rozprawą doktorską, dotyczące metod cyfrowego wyznaczenia częstotliwości sygnałów w czasie rzeczywistym [11], wykazały w niektórych przypadkach lepszą skuteczność nowego podejścia, odchodzącego od stosowanej powszechnie analizy fourierowskiej. Zaletą algorytmu jest jego prostota i duża dokładność obliczeń przy stosowaniu nawet krótkich okien pomiarowych, poniżej jednego okresu składowej podstawowej. Dokonane w następnych latach analizy, wymagające innego podejścia do wyznaczenia widma przebiegów, pozwoliły rozwinąć metody opierające się na modelu estymacyjnym Prony'ego wysokiego rzędu oraz na jego modyfikacjach. Rozkład sygnałów na zespolone składniki wykładnicze pozwala dokładniej określać parametry sygnałów w stanach przejściowych. Prace obejmowały analizy teoretyczne dotyczące samego modelu Prony'ego, a także implementacje numeryczne algorytmów obliczeniowych.

Pokazano możliwość wielu zastosowań metody do rozwiązywania trudnych problemów pojawiających się we współczesnych systemach elektroenergetycznych. Przykładowe obszary zastosowań oraz modyfikacje metody opartej na modelu Prony'ego przedstawiają prace jednotematycznego cyklu publikacji.

W pracy [1] „*Analysis of distorted waveforms in power converter systems*” przedstawiono metodę wyznaczania częstotliwości, opracowaną w oparciu o model Prony'ego. Metoda została wyprowadzona dla tych przypadków, w których przebieg zawiera dwie dominujące składowe harmoniczne oraz szum. Analiza dotyczyła sygnałów w układach przemienników częstotliwości stosowanych do zasilania silników asynchronicznych. Ze względu na regulację prędkości obrotowej silników, przebiegi napięć mogą mieć, w długich przedziałach czasu, charakter niestacjonarny. Wyznaczanie częstotliwości podstawowej składowej napięć wyjściowych przekształtników ma istotne znaczenie dla układów regulacji. Niestacjonarność przebiegów powoduje, że okno próbkowania cyfrowych metod nie może być zbyt długie. Przy stosowaniu krótko-czasowej transformacji Fouriera (STFT), dokładne wyniki otrzymuje się tylko wówczas, gdy okno próbkowania ma długość równą całkowitej wielokrotności okresu badanej składowej. W celu poprawy dokładności metody zaproponowano stosowanie filtracji medianowej. Wykorzystując metody próbkowania sygnałów pasmowych obniżono także częstotliwość próbkowania oraz stosowano krótkie okna pomiarowe. Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły poprawność metody dla zniekształconych przebiegów, w warunkach dynamicznych zmian częstotliwości składowej podstawowej.

Głównym problemem poruszonym w pracy [4] „*Parametric algorithms for frequency estimation in PWM converter systems*” jest obecność w napięciach wyjściowych przekształtników charakterystycznych zakłóceń oraz związane z nimi trudności cyfrowego przetwarzania sygnałów. Podstawowym celem badań było wyznaczenie częstotliwości składowej podstawowej napięcia, jako parametru niezbędnego do prawidłowego sterowania pracą urządzeń, szczególnie w przypadkach skoordynowanego sterowania kilku oddzielnie zasilanych napędów lub gdy ze względu na dokładność pomiaru częstotliwość nie może być wielkością wejściową dla dalszych procesów obliczeniowych. Z tego punktu widzenia celowym było opracowanie algorytmu cyfrowego do pomiaru częstotliwości składowej podstawowej napięcia w czasie rzeczywistym, uwzględniając najczęściej stosowane zakresy pracy układów zasilania silników asynchronicznych. W pracy przedstawiono założenia metody, która wykorzystuje model Prony'ego pierwszego rzędu, zarówno do filtracji sygnału, jak i obliczeń częstotliwości. Algorytm badano z udziałem zarejestrowanych sygnałów na wyjściu rzeczywistych urządzeń energoelektronicznych. Aczkolwiek w dyskusjach konferencyjnych kwestionowano niekiedy prawidłowość rejestracji przebiegów, nie dotyczyło to samej metody obliczeniowej, którą cechuje wystarczająca dokładność i szybkość obliczeniowa, nawet przy tak znacznie zniekształconych napięciach.

Publikacje [5] „*Application of wavelets and Prony method for disturbance detection in fixed speed wind farms*” oraz [17] „*Estimation of transients' parameters in wind converter systems using advanced signal processing algorithms*” zawierają omówienie zagadnień związanych ze stanami pracy farmy wiatrowej. Spadki napięcia i stany nieustalone są najczęściej spotykanymi zaburzeniami jakości energii w tego typu systemach. Estymacja parametrów sygnałów jest istotnym warunkiem poprawy jakości energii, a w konsekwencji stabilności całego systemu. Przeprowadzone badania dotyczyły stosowania nowoczesnych metod przetwarzania sygnałów, takich jak metoda Prony'ego i transformacja falkowa, do wykrywania zaburzeń, określania ich typu oraz oceny parametrów. Skuteczność algorytmu testowano dla różnych stanów pracy farmy wiatrowej włączonej do systemu elektroenergetycznego. Zaburzenia pracy symulowano dla zwarć międzyfazowych i doziemnych w różnych punktach systemu oraz dla przełączeń baterii kondensatorów



kompensacyjnych. Prowadzono także badania na sygnałach rejestrowanych w rzeczywistym systemie zawierającym generatory wiatrowe o mocy 225 kW. Proponowana metoda łączy metodę przekształcenia falkowego z estymacyjnym modelem Prony'ego wyższego rzędu. Algorytm ma za zadanie identyfikację czasu zaburzenia i wyznaczenie parametrów sygnałów w stanie przejściowym. Ponieważ model Prony'ego wysokiego rzędu wyznacza tzw. „fałszywe” składniki wykładnicze o dużych amplitudach, związane z szumem, użyto do identyfikacji składników znaczących nowego kryterium opartego na stosunku amplitud do współczynników tłumienia. Poprawność proponowanej metodologii potwierdziły otrzymane wyniki.

Zagadnienia analizy harmonicznej przedstawiono w [6] *“Measurement of IEC groups and subgroups using advanced spectrum estimation methods”*. Normy Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC) określają zniekształcenia przebiegów w systemie elektroenergetycznym jako grupy i podgrupy harmonicznych i interharmonicznych. Grupy i podgrupy wykorzystują składniki częstotliwościowe wyznaczone za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera (DFT) o stałej rozdzielczości. Korzystanie ze standardów IEC jest kompromisem pomiędzy dokładnością, uproszczeniem i unifikacją. Jednak w niektórych przypadkach analiza DFT nie jest wystarczająco dokładna ze względu na stałą rozdzielczość częstotliwości i/lub zjawisko przecieku wynikające z próbkowania. W pracy pokazano wyniki badań możliwości zastosowania do określania grup/podgrup zaawansowanych adaptacyjnych metod estymacji widma: modyfikowaną metodę Prony'ego, metodę MUSIC oraz metodę ESPRIT. Metody te w czasie analizy stosują zmienną długość okien pomiarowych, co zapewnia optymalną aproksymację widma, oraz nie charakteryzują się stałą rozdzielczością częstotliwościową. W artykule przedstawiono wyniki badań dla przebiegów w symulowanym układzie pieca łukowego oraz przebiegów zmierzonych w układzie zasilania wysokowydajnej drukarki laserowej. Algorytm oparty na modelu Prony'ego zmodyfikowano w celu nadania mu cech adaptacyjnych. Idea polegała na wielokrotnym obliczeniu składników wykładniczych sygnału, dla różnej długości okna pomiarowego. Funkcją celu było osiągnięcie minimalnego błędu aproksymacji. Badania potwierdziły możliwość otrzymania większej dokładności analizy harmonicznej, jednak kosztem znacznie większego nakładu obliczeniowego.

Metody wysokorozdzielczej analizy spektralnej sygnałów w systemie elektroenergetycznym są tematami prac [8] *“High resolution spectrum - estimation methods for signal analysis in power systems”* i [9] *“Advanced spectrum estimation methods for signal analysis in power electronics”*. Należą do nich: metoda Min-Norm oraz metoda Prony'ego. Wykorzystywana metoda Prony'ego wysokiego rzędu nie wykazuje wad tradycyjnych narzędzi analizy, takich jak np. przekształcenie Fouriera, i pozwala na dokładną estymację parametrów składników interharmonicznych. Przeprowadzono badania metody na sygnałach symulowanych oraz zarejestrowanych w rzeczywistych układach przekształtnikowych. Nowoczesne przekształtniki generują szerokie spektrum składników harmonicznych, które powodują pogorszenie jakości dostarczanej energii, zwiększają straty energii, a także wpływają negatywnie na niezawodność systemu. W niektórych przypadkach przekształtniki dużej mocy generują nie tylko składowe harmoniczne typowe dla normalnej pracy, ale również znaczną liczbę składowych niecharakterystycznych i interharmonicznych. Interharmoniczne są definiowane jako składowe o niecałkowitych krotnościach częstotliwości składowej podstawowej. Estymacja parametrów składowych sygnałów jest bardzo ważna dla urządzeń monitorowania i zabezpieczenia systemu. Projektowanie filtrów zależy od pomiaru zniekształceń krzywych prądu i napięcia. Interharmoniczne są bardziej szkodliwe niż składowe harmoniczne sygnału zniekształconego. Ich dopuszczalna zawartość w sygnale jest mniejsza niż harmonicznych.

Badania pokazały, że metody estymacji widma o dużej rozdzielczości, takie jak metoda Prony'ego, można efektywnie stosować do estymacji częstotliwości składowych sygnału. Dokładność estymacji zależy od stopnia zniekształcenia sygnału, częstotliwości próbkowania oraz liczby próbek pomiarowych. Proponowana metoda była stosowana w różnych warunkach i okazała się efektywnym narzędziem wyznaczania wszystkich wyższych harmonicznych oraz interharmonicznych zawartych w badanym sygnale.

Publikacja [23] "*Signal processing method for faults location in DC transmission system*" przedstawia wyniki badań nad zastosowaniem modelu Prony'ego do analizy zwarć w liniach wysokiego napięcia prądu stałego. Metoda wyznacza parametry składników wykładniczych oscylacyjnych, na podstawie których obliczana jest charakterystyka zależności miejsca zwarcia od tych parametrów. Zaproponowane nowe podejście stosuje kryterium wyboru znaczących składników oscylacyjnych, które opiera się na energii poszczególnych składników. Prowadzone analizy teoretyczne i symulacyjne potwierdziły możliwość zastosowania modelu do wyznaczania miejsca zwarcia w linii.

W pracy [66] "*Analysis of power system transient using wavelets and Prony method*" przedstawiono metodę wykorzystującą wielorozdzielczą analizę falkową oraz model Prony'ego wyższego rzędu do analizy systemu zawierającego baterie kondensatorów kompensujących. Układ ze względu na długie czasy przebiegów przejściowych, pojawiających się podczas przełączeń na zaciskach baterii kondensatorów, trwające nawet do kilku okresów składowej podstawowej, stanowi trudny przypadek pomiarowy. Połączenie obu metod pozwoliło na skuteczne wyznaczanie parametrów stanu przejściowego. Dokładność i szybkość pomiaru cyfrowego decyduje o powodzeniu przeciwdziałania niepożądanym zjawiskom zachodzącym w tego typu układach.

#### Na osiągnięcie habilitanta składają się:

- Implementacje numeryczne teoretycznych modeli Prony'ego pierwszego i wyższych rzędów.
- Opracowanie metody wyznaczania częstotliwości składowej podstawowej w czasie rzeczywistym opartej o model estymacyjny Prony'ego oraz filtrację cyfrową. Metoda ma zastosowania do szybkiego i dokładnego śledzenia zmian częstotliwości przebiegów zniekształconych.
- Opracowanie metod wyznaczania parametrów składowych przejściowych zniekształconych sygnałów z zastosowaniem modelu Prony'ego wyższego rzędu oraz powiązanie z metodą wielorozdzielczej analizy falkowej do identyfikacji czasu wystąpienia stanów przejściowych. Powiązanie obu metod pozwala na automatyzację prowadzonej analizy, poprzez wybór i analizę tylko tych przedziałów czasowych, w których pojawiają się składniki przejściowe w sygnałach.
- Efektywne zastosowania metody Prony'ego wysokiego rzędu do wyznaczania parametrów sygnałów niestacjonarnych w układach elektroenergetycznych takich jak: układy zasilania pieca łukowego, układy przełączanych baterii kondensatorów, linie przesyłowe podczas zwarć, układy przekształtnikowe w zaburzonych stanach pracy, maszyny asynchroniczne w awaryjnych stanach pracy, systemy zawierające generatory wiatrowe.
- Opracowanie algorytmu adaptacyjnego opartego o model Prony'ego w zastosowaniu do wyznaczania parametrów składników harmonicznych i interharmonicznych oraz ich grupowania zgodnie z normami jakościowymi IEC.
- Opracowanie kryteriów energetycznych wyboru znaczących składników wykładniczych modelu Prony'ego wysokiego rzędu w analizie sygnałów zawierających szum. Kryterium

pozwała na odrzucenie tzw. „falszywych” składników wykładniczych o dużych amplitudach.

### Syntetyczne podsumowanie dorobku naukowego:

#### Publikacje:

- Całkowita liczba publikacji **100** (włączając 12 raportów wewnętrznych Politechniki Wrocławskiej w tym 4 poufne)
- Liczba publikacji zarejestrowanych w bazie JCR **29**
- Sumaryczny Impact Factor **IF = 8,702**
- Indeks Hirscha **H = 8** (wg WoS Cited Reference Search)
- Sumaryczna liczba cytowani **354** (opracowanie Ośrodka Informacji Naukowo Technicznej Politechniki Wrocławskiej na podstawie WoS Cited Reference Search)



dr inż. Jacek Rezmer