

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI
I INFORMATYKI

mgr inż. Jarosław Zygarlicki

Analiza i kompresja danych
pomiarowych sygnału z sieci
elektroenergetycznej dla potrzeb
badania jakości energii

**AUTOREFERAT
ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

promotor:

prof. dr hab. inż. Janusz Mroczka

OPOLE 2007

SPIS TREŚCI

1.	WPROWADZENIE.....	3
2.	ANALIZA SYGNAŁU Z SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ.....	5
2.1.	DEFINICJA JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ	5
2.2.	POMIARY I MONITORING JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ	6
2.3.	METODY ANALIZY SYGNAŁU ELEKTROENERGETYCZNEGO.....	7
3.	KOMPRESJA SYGNAŁU ELEKTROENERGETYCZNEGO.....	8
3.1.	WPROWADZENIE	8
3.2.	PRZEGLĄD METOD KOMPRESJI.....	9
3.3.	PRZEGLĄD METOD STOSOWANYCH DO KOMPRESJI SYGNAŁU ELEKTROENERGETYCZNEGO	10
4.	APLIKACJA METODY KOMPRESJI ORAZ ANALIZY DLA SYGNAŁU ELEKTROENERGETYCZNEGO	10
4.1.	MODELOWANIE A ALGORYTMY KOMPRESJI TYPU ANALIZA-SYNTETA.....	10
4.2.	DOBÓR MODELI DO ALGORYTMU ANALIZY I KOMPRESJI SYGNAŁU	12
4.3.	METODA ANALIZY I KOMPRESJI Z WYKORZYSTANIEM POŁĄCZONYCH METOD PRONY ² EGO ORAZ TRANSFORMACJI FALKOWEJ	13
5.	BADANIA.....	15
5.1.	ANALIZY PRZEPROWADZONE DLA METOD PRONY ² EGO	15
5.2.	ANALIZY PRZEPROWADZONE DLA POŁĄCZONYCH METOD PRONY ² EGO ORAZ FALKOWEJ.....	18
6.	PODSUMOWANIE.....	22
7.	LITERATURA	23

1. Wprowadzenie

Wstęp

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie jakością energii elektrycznej oraz urządzeniami służącymi do jej analizy i monitoringu. Przyczyną takiego stanu rzeczy są rosnące koszty energii elektrycznej oraz awarie, które bardzo często wynikają ze złych warunków zasilania urządzeń podłączonych do sieci elektroenergetycznych.

Wpływ na pogorszenie jakości zasilania ma powiększająca się znacznie liczba i moc odbiorników niespokojnych i nieliniowych, wprowadzających do sieci elektroenergetycznej zakłócenia.

Z drugiej strony coraz częściej nowe odbiorniki energii elektrycznej charakteryzują się zmniejszoną odpornością na zaburzenia elektromagnetyczne, wynikającą ze wzrostu efektywności przetwarzania energii elektrycznej, co zazwyczaj idzie w parze z dużą wrażliwością oraz zwiększoną emisją zakłóceń.

Kumulacja różnego rodzaju urządzeń w małych, nieprzystosowanych instalacjach elektrycznych może spowodować nakładanie się zakłóceń i w efekcie znacznie pogorszyć warunki zasilania. Stan taki może prowadzić do występowania częstszych awarii lub nieprawidłowej pracy podłączonych do sieci elektroenergetycznych urządzeń. Celowe staje się zatem monitorowanie jakości energii elektrycznej.

Obecnie na rynku dostępny jest szeroki asortyment różnego rodzaju urządzeń monitorujących sieć elektroenergetyczną. Wiele z nich oprócz zapisu podstawowych parametrów jakości energii elektrycznej, dających wyłącznie możliwość weryfikacji jakości zasilania z normami, posiada także możliwość rejestracji próbek czasowych monitorowanego sygnału. Możliwość rejestracji sygnałów znacznie ułatwia, a czasami wręcz umożliwia szerszą analizę warunków zasilania.

Na podstawie zapisów próbek czasowych sygnałów możliwa staje się identyfikacja charakterystycznych cech zaburzeń, które mogą powodować brak kompatybilności z czułymi odbiornikami. Możliwa jest także lokalizacja źródeł lub przyczyn zaburzeń czy prognoza przyszłych potencjalnych problemów związanych z jakością energii elektrycznej i poprawa sytuacji jeszcze na wstępnym etapie przed wystąpieniem poważnych skutków.

Probleмами, które występują w urządzeniach tego typu, są ograniczenia rozmiaru pamięci przeznaczonej na dane pomiarowe oraz często nadmiar rejestrowanych informacji utrudniających późniejszą analizę wyników.

Ilość danych generowanych przez rejestratory zapisujące sygnał elektroenergetyczny jest znacznie większa w porównaniu ze starszymi urządzeniami. Przykładowo, w przypadku monitorowania napięć i prądów sieci trójfazowej jest zapisywanych równocześnie nawet do ośmiu sygnałów, co przy rozdzielczości zapisów wynoszącej 16 bitów i częstotliwości próbkowania równej 12,8kHz (w pewnych zastosowaniach stosuje się także znacznie większe częstotliwości) generuje strumień danych wynoszący 200kB/s. Dla takiego strumienia danych, przy pamięci rejestratora wynoszącej przykładowo 256MB, czas ciągłego zapisu sygnału wynosiłby zaledwie około 22 minuty.

Fakty te zmuszają konstruktorów urządzeń do implementowania algorytmów, umożliwiających zapisy wyłącznie wybranych, krótkich fragmentów sygnałów w celu wydłużenia czasu ciągłego monitoringu sieci elektroenergetycznej oraz ograniczenia rozmiarów tworzonych baz sygnałów. Zmusza to osoby instalujące urządzenia monitorujące do ustawiania progów wyzwolenia zapisu sygnału oraz określenia długości rejestracji danego zdarzenia, co przy braku wcześniejszej wiedzy na temat charakteru zakłóceń występujących w danej sieci w wielu przypadkach jest przyczyną dobierania niewłaściwych nastaw.

Efektom tego może być między innymi pomijanie części zjawisk, na przykład zakłóceń długookresowych lub niespełniających warunków wyzwania zapisu. Może także nastąpić bardzo szybkie zapełnianie pamięci urządzenia monitorującego i rejestrowanie nadmiaru danych, wskutek ustawienia zbyt niskiego progu wyzwania.

Na podstawie powyższych uwarunkowań powstał pomysł połączenia różnych technik cyfrowego przetwarzania sygnałów, w celu uzyskania algorytmu efektywnej analizy i kompresji danych pomiarowych sygnału z sieci elektroenergetycznej; tj. algorytmu, który pozwoliłby na rejestrację szerszej gamy zjawisk występujących w sieciach elektroenergetycznych, a z drugiej strony nie powodowałby generowania nadmiaru informacji oraz gwałtownego wzrostu rozmiarów tworzonych baz tych sygnałów.

Cel pracy

Celem pracy jest analiza wybranych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów i ich implementacja programistyczna umożliwiająca realizację kompresora i analizatora sygnałów z sieci elektroenergetycznych.

Teza

Wykorzystanie metod analizy Prony'ego oraz dyskretnej dekompozycji falkowej w cyfrowej analizie sygnału z sieci elektroenergetycznej umożliwi efektywną kompresję i archiwizację tego sygnału oraz analizę parametrów jakości energii elektrycznej.

Zakres pracy

Praca obejmuje:

- analizę parametrów jakościowych energii elektrycznej;
- analizę metod przetwarzania sygnału elektroenergetycznego;
- zestawienie wymogów normatywnych dotyczących analizy sygnału elektroenergetycznego;
- przegląd metod kompresji sygnału elektroenergetycznego;
- zestawienie parametrów znanych metod kompresji sygnału elektroenergetycznego;
- badania dotyczące metod Prony'ego pod kątem ich zastosowań do analizy i kompresji sygnału z sieci elektroenergetycznej;
- opracowanie autorskiej metody analizy i kompresji sygnału elektroenergetycznego;
- implementację opracowanej metody analizy i kompresji w środowisku programistyczno-obliczeniowym Matlab oraz Simulink;
- przeprowadzenie badań opracowanej metody dla sygnałów zamodelowanych;
- przeprowadzenie badań opracowanej metody dla sygnałów rzeczywistych;
- zestawienie parametrów analizy i kompresji autorskiej metody przetwarzania sygnału elektroenergetycznego.

2. Analiza sygnału z sieci elektroenergetycznej

2.1. Definicja jakości energii elektrycznej

Pojęcie jakości energii elektrycznej jako pojęcie interdyscyplinarne może być rozpatrywane w oparciu o różne kryteria (np.: techniczne, ekonomiczne), w związku z tym posiada ono wiele definicji. Za jedną z bardziej trafnych, zaproponowaną przez *Advisory Committee on Electromagnetic Compatibility* (ACEC) można uznać następującą definicję [31]:

„Jakość energii elektrycznej to zbiór parametrów opisujących właściwości procesu dostarczania energii do użytkownika w normalnych warunkach pracy, określających ciągłość zasilania (długie i krótkie przerwy w zasilaniu) oraz charakteryzujących napięcie zasilające (wartość, niesymetrię, częstotliwość, kształt przebiegu czasowego).

Uwaga 1: Jakość energii wyraża się stopniem zadowolenia użytkownika z warunków zasilania.

Uwaga 2: Jakość energii zależna jest nie tylko od warunków zasilania, lecz także od rodzaju stosowanego sprzętu (jego odporności na zaburzenia i jego emisyjności) oraz praktyki instalacyjnej.”

Inna definicja funkcjonującą głównie w środowisku odbiorców finalnych energii, odczuwających głównie skutki złej jakości energii jest następująca:

„Jakość energii wyraża się w napięciu i/lub w prądzie lub odchyleniu częstotliwości od jej wartości znamionowej, które powoduje w rezultacie uszkodzenie lub niewłaściwą pracę sprzętu odbiorcy energii.”

Jeszcze inna definicja pochodząca z normalizacji IEEE 1100 definiuje jakość energii jako: koncepcję zasilania i uziemiania wrażliwych urządzeń elektronicznych w odpowiedni sposób dla tych urządzeń.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki [93] opisuje jakość energii poprzez parametry sygnału napięciowego: częstotliwość, poziom napięcia i kształt krzywej.

Z pojęciem jakości energii elektrycznej nierozdzielnie związane jest pojęcie kompatybilności elektromagnetycznej, która obok stanu systemu energetycznego, może być traktowana jako jej składowa.

Kompatybilność elektromagnetyczna (między urządzeniem i jego otoczeniem lub między urządzeniami) to zdolność urządzenia do prawidłowego funkcjonowania w sposób zadowalający w danym środowisku elektromagnetycznym bez wprowadzania nadmiernych zaburzeń do tego środowiska.

Jakość energii opisywana jest zazwyczaj zbiorem parametrów (wartościami liczbowymi), które można podzielić na trzy główne grupy [32]:

- parametry dotyczące normalnych warunków pracy (wartość napięcia wraz z przedziałem tolerancji, wolne zmiany napięcia oraz długie przerwy w zasilaniu);
- parametry dotyczące zaburzonych warunków pracy (przebiecia, szybkie zmiany napięcia, niesymetria napięcia);
- parametry dotyczące zaburzeń w przebiegu czasowym napięcia zasilającego (harmoniczne, interharmoniczne, zdarzenia przejściowe, krótkotrwałe wzrosty i załamania).

2.2. Pomiary i monitoring jakości energii elektrycznej

Pomiary jakości energii elektrycznej wykonuje się przede wszystkim z dwóch powodów. Po pierwsze określa się jakość zasilania odbiorców w celu porównania wyników z wymaganiami określonymi przez normy. Po drugie w celu zbadania wpływu (emisji zaburzeń) odbiorników na sieć zasilającą [71]. Dokładność oraz zalecane metody pomiaru poszczególnych parametrów jakości energii regulują normy [76].

Zgodnie z normą PN-EN 61000-4-30 wyróżnia się dwie klasy urządzeń pomiarowych:

- klasa A
Urządzenia o dużej dokładności mające zastosowanie jako przyrządy wzorcowe (pracujące w warunkach laboratoryjnych) oraz do oceny spełnienia warunków kontraktu na dostawę energii elektrycznej.
- klasa B
Urządzenia o mniejszej dokładności traktowane jako orientacyjne wskaźniki stanu jakości energii elektrycznej.

Dodatkowo urządzenia pomiarowe jakości energii dzieli się w zależności od zastosowań na trzy podstawowe grupy [30]:

- mierniki do celów diagnostycznych
Są to urządzenia do ciągłego monitorowania nietypowych stanów sieci zasilającej. Oprócz pomiarów i rejestracji podstawowych parametrów jakości oraz przekroczeń ich wartości określonych w normach, urządzenia tego typu mają możliwość zapisu próbek czasowych przebiegów napięć i prądów (rejestracji kształtu napięcia lub prądu), jednej lub wielu faz sieci zasilającej podczas oraz bezpośrednio przed wystąpieniem zaburzenia.
- mierniki do celów standaryzacji i kontraktów
Zadaniem urządzeń tego typu jest najczęściej: określenie emisji zaburzeń badanego urządzenia, określenie odporności badanego urządzenia na ustalony rodzaj i wartość zaburzenia, określenie wartości zaburzeń w zadanym punkcie sieci elektroenergetycznej i porównanie z wartościami normatywnymi.
- mierniki do celów statystycznych
Przykładem mierników realizujących funkcje statystyczne są mierniki zapadów. W urządzeniach tego typu realizowany jest ciągły monitoring sieci elektroenergetycznej a w trakcie wystąpienia zdarzenia odbywa się rejestracja próbek czasowych. Próbki te reprezentujące zapis zdarzenia (zapadu lub przerwy) są następnie poddawane analizie statystycznej a wynik analizy jest archiwizowany.

Duże znaczenie praktyczne mają mierniki przeznaczone do celów diagnostycznych, zapisujących kształt zaburzeń sygnału elektroenergetycznego. Wykonywane przez mierniki rejestracje sygnału, umożliwiają znacznie szerszą analizę stanu sieci elektroenergetycznej w porównaniu z miernikami mierzącymi tylko parametry jakości energii lub ich zgodność z określonymi normami. Specjaliści z dziedziny jakości energii mają dzięki takim zapisom możliwość [30]:

- identyfikacji charakterystycznych cech zaburzeń, które mogą powodować brak kompatybilności z czułymi odbiornikami;
- identyfikacji oraz lokalizacji źródeł lub przyczyn zaburzeń;

- wyboru i weryfikacji poprawności pracy rozwiązań zabezpieczających przed skutkami zaburzeń;
- prognozowania przyszłych potencjalnych problemów związanych z jakością energii elektrycznej i poprawy sytuacji jeszcze na wstępnym etapie, przed wystąpieniem poważnych skutków.

2.3. Metody analizy sygnału elektroenergetycznego

Analizę sygnału z sieci elektroenergetycznej można sprowadzić do zadania wyznaczenia parametrów jakości energii elektrycznej. Zagadnienie to pojawia się w literaturze od dłuższego czasu. Obowiązujące dokumenty normatywne z tego zakresu [76] bardzo często narzucają sposób realizacji pomiarów jakości energii, a z drugiej strony ciągle jeszcze pomijają szereg zjawisk występujących w sieciach elektroenergetycznych lub traktują je w sposób statystyczny. Dlatego też prowadzone są intensywne badania nad zastosowaniem alternatywnych do przyjętej w normach transformacji Fouriera metod analizy sygnału elektroenergetycznego, mających poprawić dokładność lub szybkość wyznaczenia parametrów jakości energii. Poszukiwane są metody, nie tylko częstotliwościowych, ale także czasowo-częstotliwościowych analiz przydatnych szczególnie do przetwarzania sygnałów niestacjonarnych. Prowadzone są prace nad połączeniami różnych metod oraz praktycznymi implementacjami złożonych algorytmów na systemy o średniej lub niskiej mocy obliczeniowej, do zastosowań w urządzeniach monitorujących jakość energii. Spośród metod niefourierowskich obiecujące wyniki dają metody należące do grupy metod parametrycznych i podprzestrzeni [4].

Popularne metody parametryczne to między innymi: modelowanie ARMA i pokrewne (AR, MA) [66], [67], modelowanie metodą Prony'ego [79], [40], [66], [70], [64], [65], [62], [59], [58], [63], [60], [61], [56], [57], [6], [39], [99], [77], [94], [20], szczególnie przydatne w analizie sygnałów eksponencjalnie tłumionych, analiza z wykorzystaniem filtrów Kalmana [14], [15], [8], metody oparte o dekompozycję SVD [53], [55], [52], [54], [42].

Do metod podprzestrzeni znajdujących zastosowanie w analizie sygnałów elektroenergetycznych, zalicza się między innymi metodę MUSIC (ang.: *MUltiple SIgnal Classification*) [53], [55], [54], [42], [66], [64] i metodę Min-Norm [45], [44], [64], [59], [58], [60], [56]. Są to metody operujące na wartościach własnych i wektorach własnych macierzy autokorelacji.

Osobną grupę metod, stanowią rozwijane implementacje metod typowych dla sygnałów niestacjonarnych [48], [45], [44], [46] – metod analizy czasowo-częstotliwościowej. Do tej grupy metod zalicza się analizy falkowe diadyczne oraz z wykorzystaniem innych niż binarne drzew dekompozycji (na przykład pakiety falkowe) [81], [1], [73], [5], [82], [91], [105], [110], [92], [35], [3]. Do opisanej grupy zalicza się także: okienkową transformację Fouriera STFT [44], [90], [34], przekształcenia z klasy Cohena, w szczególności transformacja Wignera-Ville'a, pseudotransformacja Wignera-Ville'a oraz wygładzona pseudo-transformacja Wignera-Ville'a [48], [45], [47], [44]. Ciekawą metodę w analizie sygnału elektroenergetycznego stanowić może także transformata S [46].

Dużą popularność zdobywają ostatnio także połączenia różnych metod, w tym metod analiz częstotliwościowych lub czasowo-częstotliwościowych z sieciami neuronowymi lub systemami logiki rozmytej [41], [27], [108], [10], [12], czy innymi metodami [14], [9], [26]. Rozwijane są także metody analizy z wykorzystaniem struktur adaptacyjnych [18], [16], [11], [25]. Prowadzone są również badania nad automatyczną klasyfikacją oraz lokalizacją źródeł zakłóceń sygnałów z sieci elektroenergetycznych [12], [102], [72], [22], [13], [19], [81], [33], [27].

3. Kompresja sygnału elektroenergetycznego

3.1. Wprowadzenie

Celowość stosowania kompresji

Proponowane przez normy, statystyczne podejście do badania jakości energii elektrycznej, nie zawsze jest wystarczające. W wyniku uśredniania pomiarów w stosunkowo długim czasie, pomija się cały szereg krótkotrwałych zjawisk przejściowych, których obecność może mieć kluczowe znaczenie dla właściwej pracy odbiorników. Taka analiza sygnału z sieci elektroenergetycznej, prowadzi często do błędnej diagnozy jakości zasilania i może powodować niekończące się kłopoty z poprawną pracą, czy awaryjnością wielu urządzeń podłączonych do danej sieci. Z tych powodów coraz częściej do monitoringu stanu sieci elektroenergetycznej stosuje się urządzenia posiadające możliwość rejestracji próbek czasowych (wartości chwilowych) sygnałów napięcia i prądu. W efekcie, ze względu na lawinowo rosnącą ilość archiwizowanych danych gwałtownie wzrastają wymagania, co do rozmiaru zainstalowanej w urządzeniu monitorującym pamięci, a także rozmiaru przestrzeni dyskowej baz danych sygnałów elektroenergetycznych. Najlepszym rozwiązaniem z ekonomicznego punktu widzenia, pozwalającym na znaczne zredukowanie rozmiaru generowanych w opisany sposób danych jest kompresja danych.

Wprowadzenie do kompresji danych

Początki dziedziny kompresji danych wiążą się z publikacją pracy: „A Mathematical Theory of Communication” C.E. Shannon’a w 1948 roku. Shannon w swej pracy [98] zaproponował sposób kwantyzacji informacji w sensie matematycznym. Zdefiniował ważne z punktu widzenia kompresji danych twierdzenia. Shannon stworzył podstawy dla współczesnej teorii informacji, wykorzystywanej w wielu dziedzinach nauki: informatyce, elektronice, ale także i w biologii, psychologii a nawet w literaturze [101].

Kompresję można także zdefiniować jako algorytm, który danym reprezentowanym przez ciąg bitów o określonej długości, przyporządkowuje ciąg bitów o mniejszej długości (tzw. postać skompresowaną danych), w porównaniu z reprezentacją sygnału oryginalnego. Stosunek liczby bitów sygnału oryginalnego N_x do liczby bitów sygnału skompresowanego $N_{\bar{x}}$ nazywany jest współczynnikiem kompresji CR , charakteryzującym poszczególne algorytmy kompresji:

$$CR = \frac{N_x}{N_{\bar{x}}}. \quad (3.1.)$$

Mówiąc o algorytmach kompresji tak naprawdę rozważamy dwa algorytmy: algorytmy kompresji, których działanie opisano powyżej oraz algorytmy rekonstrukcji [97]. Algorytmy rekonstrukcji mają za zadanie, odtworzenie z postaci skompresowanej, sygnału oryginalnego nazywanego tutaj wynikiem rekonstrukcji. Rekonstrukcja sygnału odbywa się w dekodерze podczas procesu dekompresji.

W zależności od wymagań stawianych algorytmom rekonstrukcji, algorytmy kompresji można podzielić na dwie główne klasy: algorytmy kompresji stratnej oraz algorytmy kompresji bezstratnej.

W metodach kompresji bezstratnej od algorytmów rekonstrukcji oczekuje się, wiernego odtworzenia danych oryginalnych tzn., że wynik rekonstrukcji musi być identyczny z postacią oryginalną danych. Dokładne odtworzenie skompresowanych danych ma bardzo duże

znaczenie na przykład przy kompresji tekstu, gdzie przekłamanie kilku nawet bitów może zmienić sens całego przekazu. Nie zawsze jednak wymóg wiernego odtworzenia sygnału oryginalnego jest najistotniejszy, bardzo często dopuszcza się utratę części informacji zawartej w sygnale, w zamian za możliwość uzyskania wyższego współczynnika kompresji.

Rozpatrując algorytmy kompresji stratnej, definiuje się oprócz współczynnika kompresji także miarę utraty informacji, czy też błędy wprowadzane do sygnału w wyniku rekonstrukcji. Błędy te mogą być reprezentowane na przykład przez współczynnik SNR:

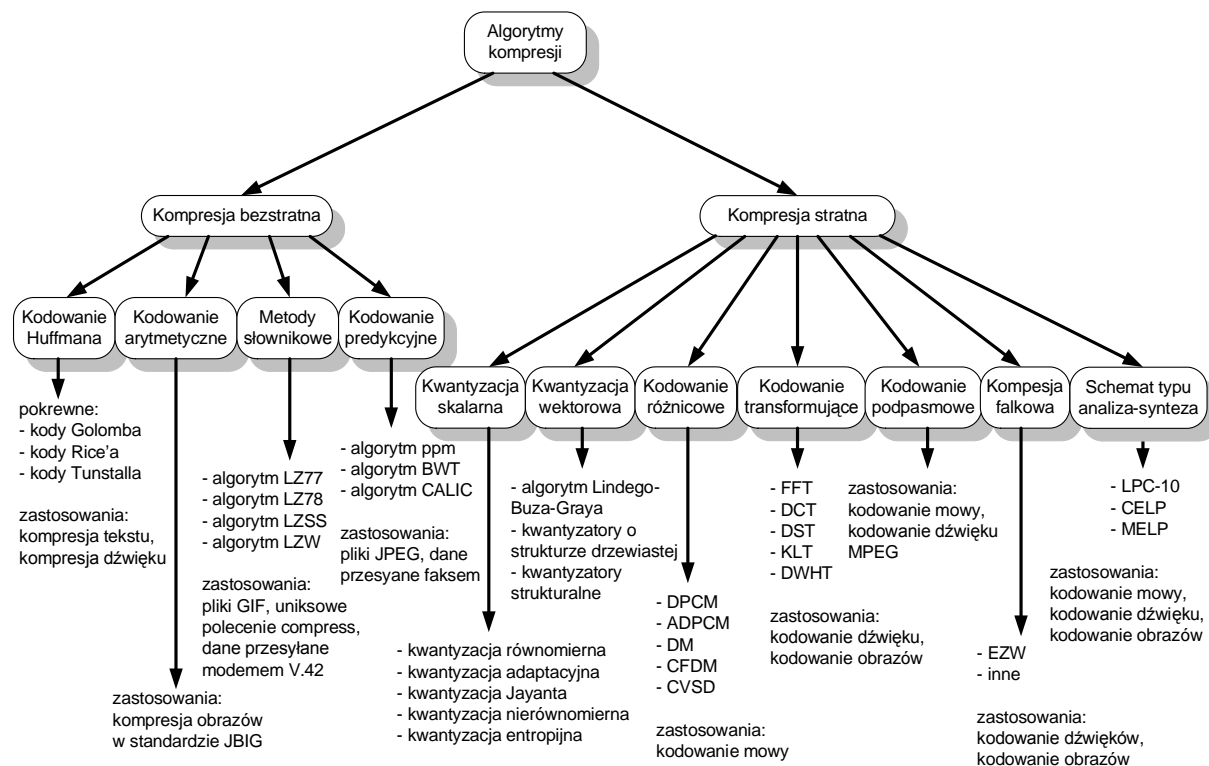
$$SNR_{dB} = 10 \log \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2}{\sum_{n=0}^{N-1} (x[n] - \hat{x}[n])^2} \right), \quad (3.2.)$$

gdzie:

- N – liczba próbek sygnału,
- $x[n]$ – rzeczywista amplituda n -tej próbki sygnału oryginalnego,
- $\hat{x}[n]$ – rzeczywista amplituda n -tej próbki sygnału zrekonstruowanego.

3.2. Przegląd metod kompresji

Podstawowe metody kompresji można sklasyfikować według schematu przedstawionego na rys. 4.3. Wszystkie metody kompresji można podzielić na dwie klasy tj. metody kompresji stratnej oraz metody kompresji bezstratnej. Niektóre rodziny metod (np.: kompresja falkowa, kodowanie podpasmowe) przedstawione na rys. 3.1. mogą ponadto występować, po spełnieniu pewnych warunków, w wersjach zaliczanych zarówno do metod bezstratnych jak i stratnych. Bardzo często stosuje się także, w złożonych algorytmach kompresji, połączenia metod stratnych z bezstratnymi (spotykane w kompresji falkowej, czy transformującej).



Rys. 3.1. Klasyfikacja metod kompresji.

Obecnie intensywnie rozwijane są metody kompresji opartej na przekształceniach sygnału do dziedziny częstotliwości (kodowanie transformujące) lub częstotliwości i czasu (kompresja falkowa). Metody te są spotykane między innymi w standardzie MPEG [111]. Dużą popularność zdobyły także, dzięki upowszechnieniu telefonii komórkowej, algorytmy kompresji typu analiza-synteza (na przykład algorytm LPC-10 [111]).

3.3. Przegląd metod stosowanych do kompresji sygnału elektroenergetycznego

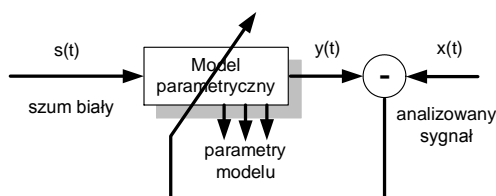
Od kilku lat wzrasta zainteresowanie możliwością kompresji danych pomiarowych (sygnałów) z urządzeń monitorujących sieci elektroenergetyczne. Kompresja rejestrowanych przebiegów, umożliwia efektywniejsze wykorzystanie urządzeń monitorujących, zwiększając czas ciągłego zapisu sygnału. Możliwe staje się także przesyłanie danych on-line, np.: poprzez modemy z urządzeń rozlokowanych na rozległym obszarze do komputera zbiorczego. Radykalnie zmniejszają się także koszty przesyłania danych tam, gdzie wykorzystano łącza, przy których pobierane są opłaty w zależności od ilości przesłanych danych (np.: systemy transmisji danych GPRS). Archiwizowanie skompresowanych danych w bazach sygnałów elektroenergetycznych, redukuje znacząco wymagania sprzętowe, co do rozmiarów pamięci masowych (dysków twardej) baz danych. Wiele algorytmów dokonuje także, wstępnej analizy sygnału ułatwiając ich późniejsze przetwarzanie. Ponieważ kompresja sygnałów elektroenergetycznych jest jeszcze stosunkowo nowym pojęciem, dlatego brakuje odpowiednich normalizacji w tej dziedzinie, określających na przykład dopuszczalne zniekształcenia kompresji (błędy kompresji) zrekonstruowanych sygnałów. Jediną wzmiankę dotyczącą tego zagadnienia, można znaleźć w amerykańskiej normie IEEE 1159.3 [74] w części dotyczącej zalecanego formatu pliku (PQDIF), w którym zapisywane są zarejestrowane dane pomiarowe, gdzie określono możliwość kompresji sygnałów za pomocą bezstratnego algorytmu o niskim współczynniku kompresji – ZLIB [38] (zmodyfikowana wersja LZ77). Normy europejskie natomiast, problem kompresji danych w monitoringu jakości energii elektrycznej pomijają całkowicie. Nie mniej jednak, prowadzone są prace nad różnego rodzaju metodami kompresji sygnału elektroenergetycznego [96], [80], [68], [23], [49], [29], [95], [51], [89], [104], [13], [86], [28], [87], [96], [7], [107], [85], [109], [17], [50], [2], [69], [24], [84], [88], [103]. Spotykane są także, rozwiązania komercyjne stosowane w urządzeniach monitorujących na przykład algorytm PQZIP firmy Elspec [106], czy w urządzeniach firmy Dranetz-BMI [36] (na przykład Encore Series /61000 System) z algorytmem kompresji ZLIB (format PQDIF).

4. Aplikacja metody kompresji oraz analizy dla sygnału elektroenergetycznego

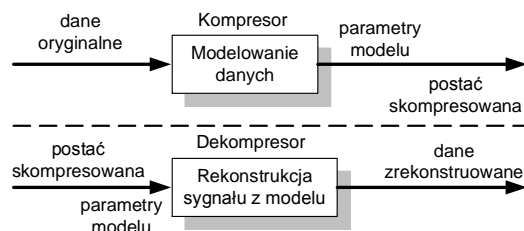
4.1. Modelowanie a algorytmy kompresji typu analiza-synteza

Spośród przedstawionych w poprzednim rozdziale metod kompresji sygnałów, najbardziej atrakcyjnym z punktu widzenia oceny jakości energii elektrycznej wydają się algorytmy kompresji typu analiza-synteza [97], co zostanie uzasadnione poniżej. Schematy kompresji tego typu zakładają, że znany jest model parametryczny analizowanego sygnału. Model ten jest stały a zmianie będą ulegać jedynie jego parametry. Kompresja w tym przypadku polega na wyznaczeniu parametrów modelu w kompresorze (koderze) i śledzeniu – estymowaniu ich

zmian. Schemat tego typu przypomina schemat dla modelowania parametrycznego sygnału [113] (rys. 4.1.),

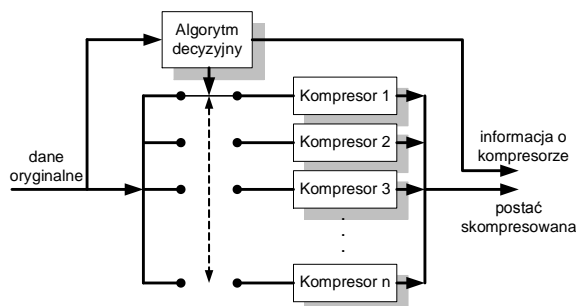


Rys. 4.1. Schemat blokowy modelowania parametrycznego dla analizowanego sygnału.

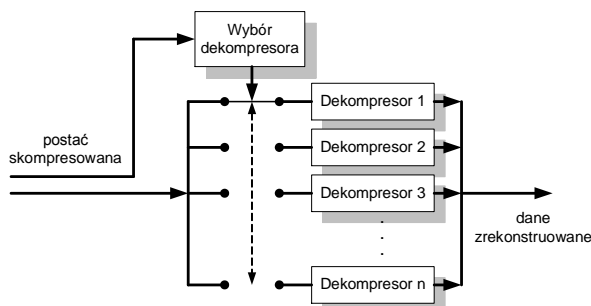


Rys. 4.2. Algorytm kompresji i rekonstrukcji dla schematu typu analiza-synteza – schemat ogólny.

Postać skompresowaną stanowi zbiór parametrów modelu w funkcji czasu i na ich podstawie odtwarzany jest sygnał w dekodерze. Ogólną zasadę kompresji tego typu przedstawia rys. 4.2. Próbkі postaci skompresowanej sygnału nie są bezpośrednią reprezentacją próbek sygnału oryginalnego, a do odtworzenia sygnału wymagana jest implementacja modelu sygnału w dekodерze zgodna z modelem, na podstawie którego odbywała się kompresja. Jak wynika z opisu kompresor tworzony jest dla konkretnej klasy sygnałów i nie może być stosowany jako uniwersalny kompresor, ze względu na możliwość wystąpienia niezgodności przyjętego modelu dla różnych sygnałów. Fakt ten stanowi pewną wadę metody i wymaga czasami wprowadzania kilku modeli danych, co związane jest z koniecznością przesyłania dodatkowych informacji związanych na przykład z przełączaniem modelu (rys. 4.3., rys. 4.4.).

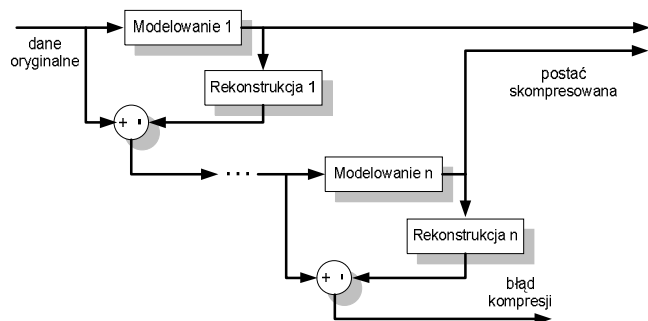


Rys. 4.3. Schemat kompresora z przełączanymi algorytmami kompresji.

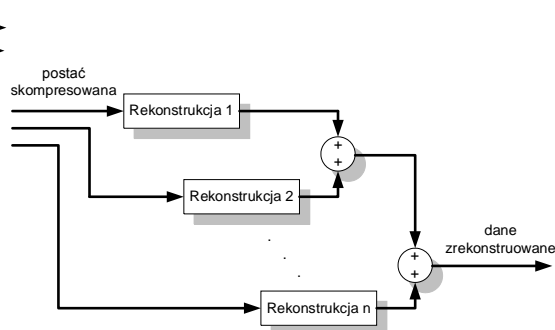


Rys. 4.4. Schemat dekompresora z przełączanymi algorytmami kompresji.

Dla bardziej złożonych sygnałów (dla większości sygnałów rzeczywistych) korzystniejsze może okazać się, zastosowanie schematu z modelowaniem równoległym (rys. 4.5., rys. 4.6.).



Rys. 4.5. Schemat kompresora z równoległymi algorytmami kompresji.



Rys. 4.6. Schemat dekompresora z równoległymi algorytmami kompresji.

Schemat kompresji typu analiza-synteza jest historycznie starszym sposobem kompresji w porównaniu ze spotykanymi obecnie metodami stratnymi opartymi o pewne oszacowania sygnału oryginalnego (na przykład stratna kompresja falkowa [4]). Dokładność rekonstrukcji sygnału (błąd kompresji) zależy tutaj przede wszystkim od wierności modelu parametrycznego z rzeczywistym procesem generującym sygnał poddawany kompresji. Stąd główny problem podczas tworzenia algorytmów kompresji typu analiza-synteza, leży właśnie w dobraniu odpowiedniego modelu parametrycznego oraz dokładności estymacji jego parametrów, dlatego też popularność tego typu algorytmów była przez wiele lat dość mała. Dopiero intensywny rozwój multimediiów oraz telefonii komórkowej przyczynił się do zintensyfikowania prac nad kompresorami parametrycznymi, ze względu na ich bardzo wysoki współczynnik kompresji, umożliwiający osiągnięcie niskich strumieni bitowych danych, wymaganych między innymi przy transmisjach radiowych, czy archiwizacji znacznej ilości danych na nośnikach o ograniczonej pojemności. W efekcie opracowano między innymi szereg wokoderów [112], [100] opartych o modelowanie sygnału mowy, na podstawie których możliwe stało się wydajne kompresowanie mowy poprzez parametryczne modelowanie źródła dźwięku – krtani oraz toru transmisji dźwięku – jamy ustnej (koder LPC, MLPC, CELP [101]). Algorytmy kompresji typu analiza-synteza znalazły także zastosowanie do kompresji sygnałów audio (nie tylko mowy) np.: algorytmy ASAC, HILN, TLS-LP, DWPT, itp. [78], [21] oraz video na przykład standard kodowania obrazów MPEG [111].

Modelowanie parametryczne składające się na opisywaną rodzinę metod kompresji posiada dodatkowo pewne zalety, które ujawniają się w przypadku kompresji sygnałów elektroenergetycznych do oceny jakości energii. Jak już wcześniej omówiono postać skompresowana sygnału jest zbiorem parametrów danego modelu procesu generującego sygnał, tak więc postać skompresowana sygnału elektroenergetycznego - jeżeli założony zostanie odpowiedni model, może opisywać parametry jakości energii elektrycznej i ułatwić jej późniejszą analizę. W efekcie produktem niejako „ubocznym” kompresji parametrycznej oprócz wysokiego współczynnika kompresji, mogła by być analiza sygnału elektroenergetycznego.

4.2. Dobór modeli do algorytmu analizy i kompresji sygnału

Na podstawie analizy zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych ustalono model matematyczny opisujący szereg zdarzeń: harmoniczne, interharmoniczne oraz zdarzenia przejściowe oscylacyjnie tłumione. Składowe te mogą być zapisane za pomocą zależności:

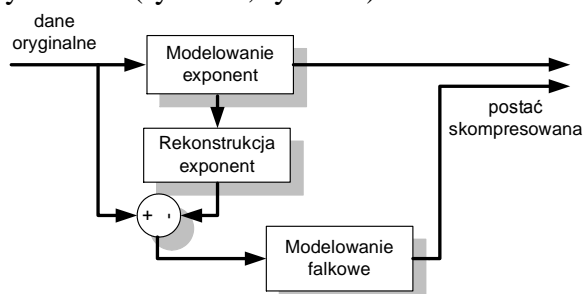
$$u(t) = \sum_{k=1}^p A_k \cdot \exp[(\alpha_k + j2\pi f_k) \cdot t + j\Theta_k], \quad (4.1.)$$

gdzie:

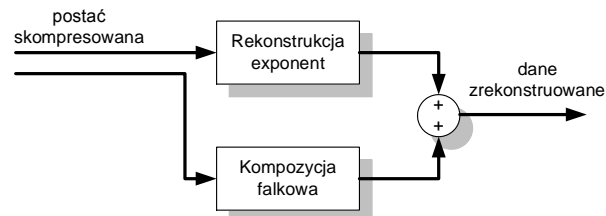
- A_k – znormalizowana amplituda k -tej zespolonej funkcji eksponencjalnej [],
- α_k – współczynnik tłumienia k -tej składowej [1/s],
- f_k – częstotliwość k -tej sinusoidy [Hz],
- Θ_k – faza początkowa k -tej sinusoidy [rad],
- p – rozmiar modelu [].

Powyższy model matematyczny przy odpowiedniej aktualizacji jego parametrów umożliwia przedstawienie szerokiej grupy sygnałów występujących w sieciach elektroenergetycznych, przy znacznej redukcji ich opisu (możliwość uzyskania wysokiego współczynnika kompresji sygnału), dając jednocześnie możliwość oceny parametrów jakości energii elektrycznej. W pewnych sytuacjach model ten okazuje się jednak niewystarczający.

W sygnale elektroenergetycznym mogą występować składowe stochastyczne, nieokresowe, takie jak na przykład zdarzenia impulsowe, serie przepięć, krótkie przerwy, przepięcia, szum i inne, dla których model tłumionych eksponencjalnie sinusoid nie jest odpowiedni. Do reprezentacji tego typu składowych wymagany jest dodatkowy algorytm w schemacie kompresji typu analiza-synteza, który uzupełni przedstawiony powyżej model parametryczny. Na podstawie przeglądu literaturowego [98], [101], [97], [96], [80], [68], [23], [49], [29], [83], [43], [95], [51], [89], [104], [13], [86], [28], [87], [96], [7], [107], [85], [109], [17], [50], [2], [69], [24], [84], [88], [103] zdecydowano o zastosowaniu do tego celu dyskretnej dekompozycji falkowej – DWT, falki Symlets ósmego rzędu z czterema poziomami dekompozycji. Ze względu na przyjęty podstawowy model eksponencjalny sygnałów elektroenergetycznych do wyznaczania parametrów tego modelu, zastosowano metodę Prony’ego [79], [40], [66], [70], [64], [65], [62], [59], [58], [63], [60], [61], [56], [57], [6], [39], [99], [77], [94], [20] zaproponowaną przez Gaspard’a Richie Baron’a de Prony w 1795 roku do modelowania zjawisk zachodzących przy rozprzestrzenianiu się gazów. Ogólny schemat proponowanego algorytmu kompresji oraz rekonstrukcji bazującego na równoległym połączeniu algorytmów kompresji (rys. 4.5., rys. 4.6.) przedstawiono na poniższych rysunkach (rys. 4.7., rys. 4.8.).



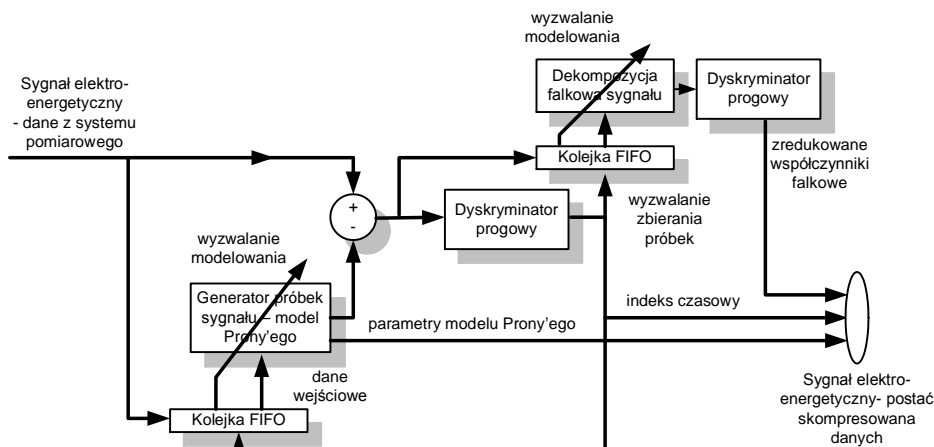
Rys. 4.7. Ogólny schemat algorytmu kompresji.



Rys. 4.8. Ogólny schemat algorytmu rekonstrukcji.

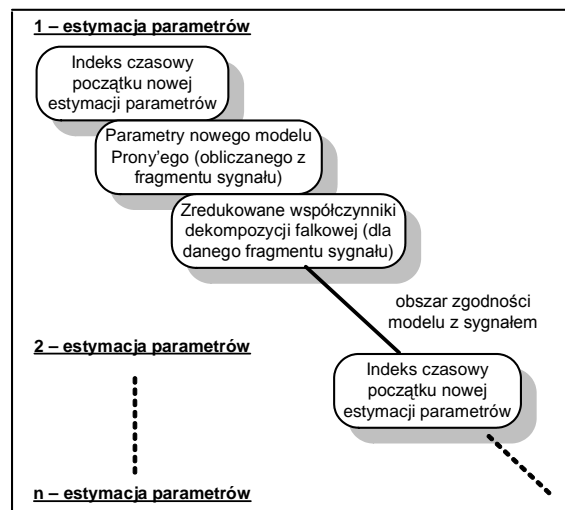
4.3. **Metoda analizy i kompresji z wykorzystaniem połączonych metod Prony’ego oraz transformacji falkowej**

Na bazie modelowania za pomocą metody Prony’ego najmniejszych kwadratów oraz dyskretnej analizy falkowej zrealizowano i zaimplementowano w środowisku Matlab algorytm analizy i kompresji sygnału elektroenergetycznego. Uproszczony schemat blokowy algorytmu analizy i kompresji zamieszczono na rysunku 4.9.



Rys. 4.9. Uproszczony algorytm kompresji.

W przedstawionym algorytmie kompresji, kolejne próbki sygnału z sieci elektroenergetycznej porównywane są z próbkami generowanymi na podstawie modelu Prony'ego o parametrach obliczonych wcześniej. Jeżeli wynik porównania próbek rzeczywistych i modelu przekroczy pewien zadany próg błędu (próg wyzwolenia), to następuje wyzwolenie nowej estymacji parametrów modelu Prony'ego. W następnym kroku aktualizowany jest model, na podstawie którego generowane są próbki porównywane z próbkami rzeczywistymi. Model Prony'ego obliczany jest na podstawie ustalonej liczby próbek, które pojawią się po próbce inicjującej nową estymację parametrów, włącznie z tą próbą. Próbki te tworzą okno analizy sygnału. Próbki będące różnicą próbek rzeczywistych i modelu dla danego okna analizy dodatkowo poddawane są kompresji falkowej. Kompresja falkowa polega tutaj na dekompozycji sygnału oraz operacji dyskryminacji progowej [4], w celu zmniejszenia reprezentacji postaci skompresowanej, poprzez zerowanie najmniej znaczących produktów dekompozycji oraz kodowaniu położenia zer w wektorze dekompozycji. Postać skompresowana sygnału elektroenergetycznego w przedstawionym algorytmie złożona jest z indeksu czasowego początku nowej analizy sygnału, parametrów modelu Prony'ego oraz zredukowanych współczynników dekompozycji falkowej. Ogólną postać skompresowanego sygnału przedstawiono na rys. 4.10.



Rys. 4.10. Ramka skompresowanych danych.

Sygnał jest rekonstruowany na podstawie modelu Prony'ego oraz wektora czasu zaczynającego się od indeksu czasowego danej estymacji, a kończącego na indeksie czasowym następnej estymacji. Kolejne próbki w obrębie ustalonego w algorytmie kompresji okna analizy, są dodatkowo sumowane z próbkami wygenerowanymi podczas odwrotnej transformacji falkowej – IDWT, po wcześniejszym uzupełnieniu zredukowanego wektora dekompozycji próbkami zerowymi do oryginalnego rozmiaru sprzed operacji dyskryminacji progowej. Takie nakładanie modelu falkowego umożliwia rekonstrukcję składowych harmonicznych oraz zdarzeń oscylacyjnych tłumionych modelowanych za pomocą metody Prony'ego oraz pozostałych składowych sygnału, które nie zostały poprawnie zamodelowane tą metodą, w obrębie założonego okna analizy.

5. Badania

5.1. Analizy przeprowadzone dla metod Prony'ego

Badania symulacyjne metod Prony'ego oraz wyciągnięte z nich wnioski były pierwszym etapem projektowania proponowanego algorytmu analizy i kompresji sygnału elektroenergetycznego. Analizie poddano metodę Prony'ego w wersji oryginalnej oraz metodę Prony'ego najmniejszych kwadratów. Zastosowano w tym celu wygenerowane w środowisku Matlab sygnały testowe opisane w tabelach 5.1 oraz 5.2. Wybrane symulacje przedstawiono na rysunkach. 5.1. – 5.4.

Tabela 5.1. Opis składowych sygnału testowego do analizy metod Prony'ego.

Nr składowej	amplituda	częstotliwość	faza początkowa	współczynnik tłumienia
	A_i	f_i	θ_i	α_i
	[]	[Hz]	[°]	[1/s]
1	100,00	50,00	45,0	-10,0
2	30,00	150,00	45,0	-10,0
3	20,00	250,00	45,0	-10,0

Tabela 5.2. Opis składowych sygnału testowego do analizy rozdzielczości metod Prony'ego.

Nr składowej	amplituda	częstotliwość	faza początkowa	współczynnik tłumienia
	A_i	f_i	θ_i	α_i
	[]	[Hz]	[°]	[1/s]
1	100,00	50,00	45,0	-10,0
2	100,00	f_2	45,0	-10,0

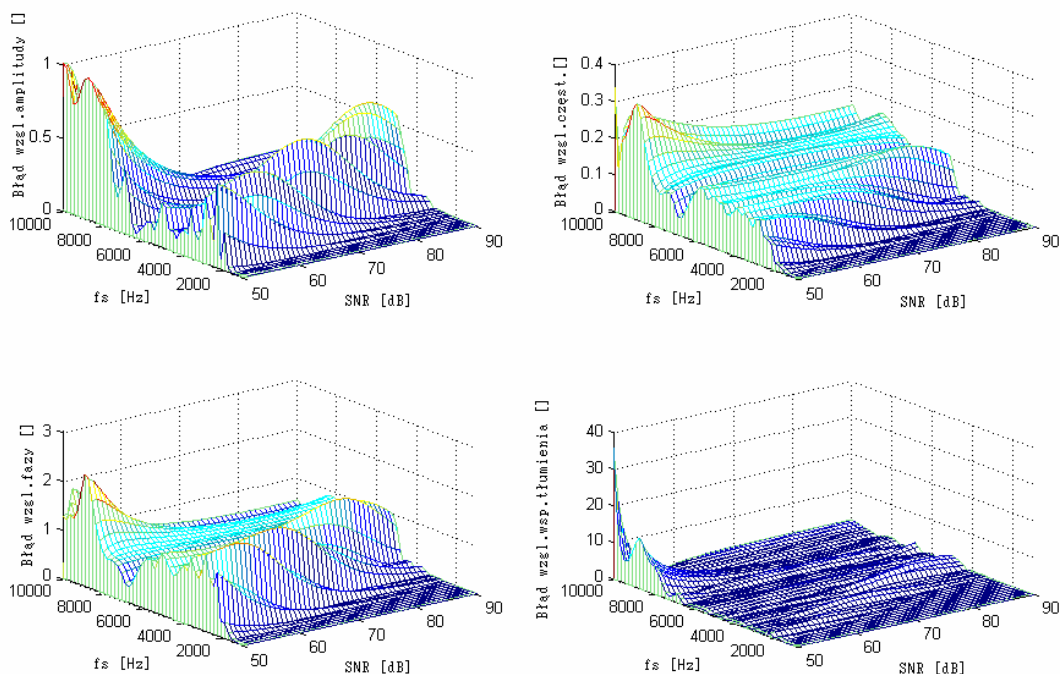
Przebadano między innymi:

- wpływ szumu zawartego w sygnale na dokładność wyznaczania parametrów składowych harmonicznym sygnału;
- wpływ ilości analizowanych próbek sygnału na dokładność estymacji parametrów, przy różnych poziomach szumu zawartego w sygnale;
- rozdzielczość częstotliwościową metod Prony'ego w zależności od poziomu szumu wprowadzanego do sygnału;
- wpływ częstotliwości próbkowania sygnału na rozdzielczość częstotliwościową metod Prony'ego;
- wpływ rozmiaru założonego modelu na dokładność estymacji parametrów;
- przydatność metody do analizy sygnałów niestacjonarnych.

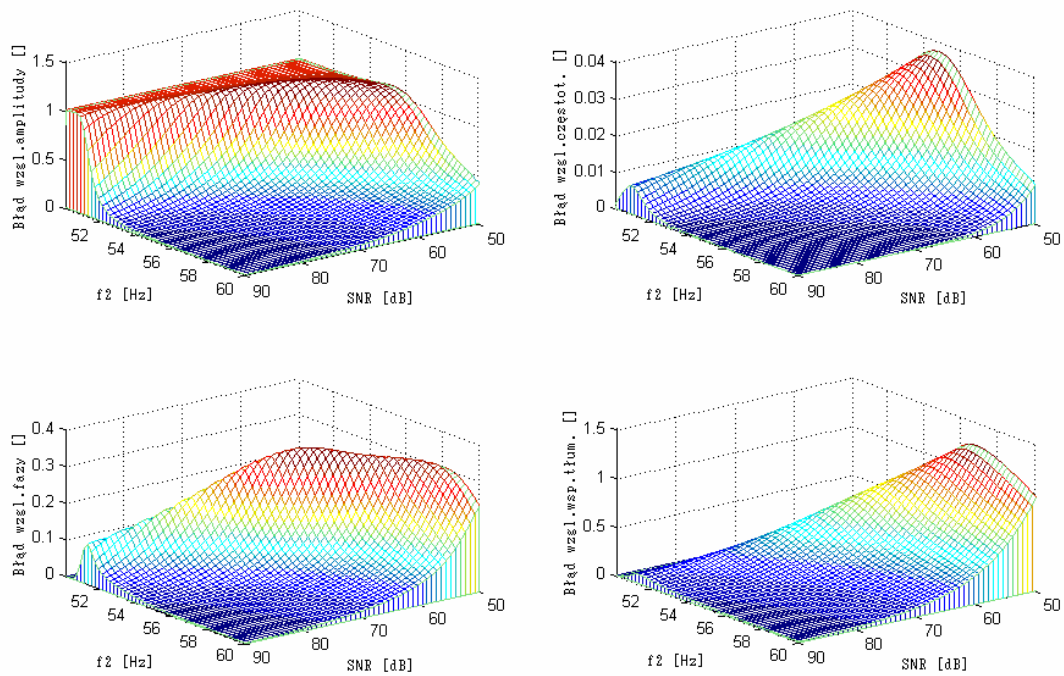
Wynioskowano że:

- dodanie do sygnału dodatkowych składowych wpływa na zwiększenie błędów estymacji;
- istnieje zależność błędów estymacji od poziomu szumu w sygnale, zwiększenie jego poziomu powoduje pogorszenie dokładności. Dodatkowo mogą się jednak pojawić lokalne ekstrema dla pewnych poziomów szumu;

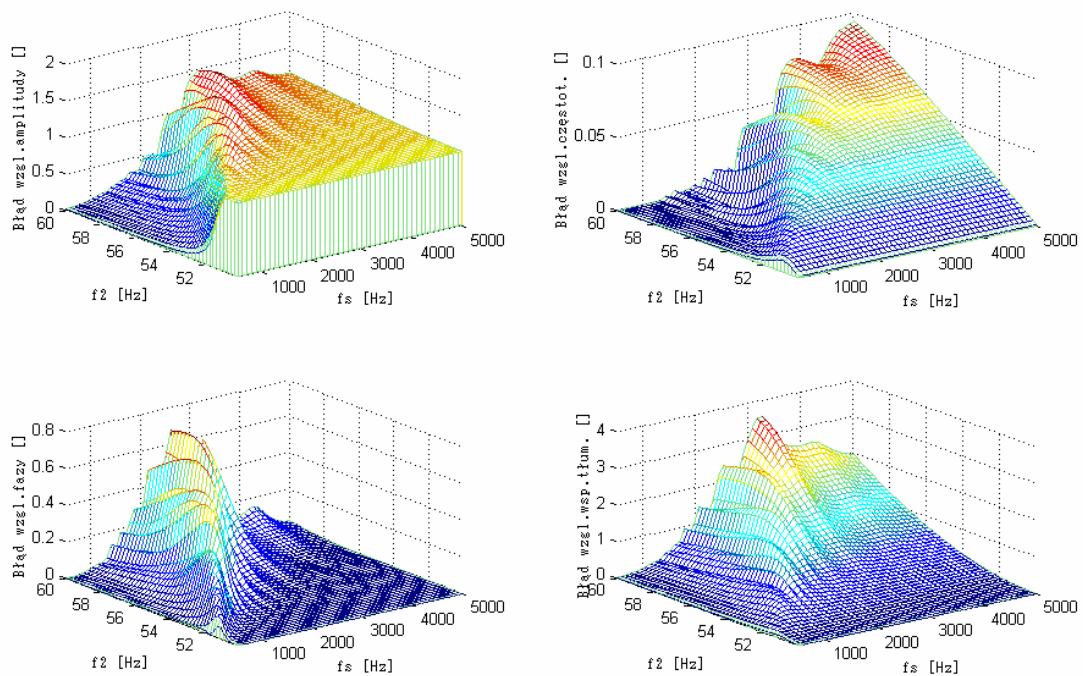
- ekstrema lokalne na osiach błędów wyznaczania parametrów występują także, dla pewnych częstotliwości próbkowania, co daje możliwość znacznego zmniejszenia błędów estymacji poprzez dopasowanie częstotliwości próbkowania;
- metoda Prony'ego najmniejszych kwadratów daje możliwość uzyskania znacznie większej rozdzielczości częstotliwościowej analizy w porównaniu z oryginalną metodą Prony'ego;
- zwiększenie liczby analizowanych próbek w metodzie Prony'ego najmniejszych kwadratów, daje wyraźną poprawę dokładności estymacji dopiero przy znacznym udziale szumu w sygnale;
- zmniejszenie częstotliwości próbkowania poniżej pewnej wartości znacznie poprawia rozdzielczość metod zarówno oryginalnej jak i najmniejszych kwadratów;
- przy pewnych wartościach parametru p mogą pojawić się w trakcie obliczeń macierze źle uwarunkowane, co prowadzi do dużych błędów przy wyznaczaniu parametrów modelu. Stwierdzono także, że zjawisko to występuje dla wąskich zakresów parametru p (przy większych rozmiarach modelu);
- przy obecności w sygnale większej liczby składowych sinusoidalnych eksponencjalnie tłumionych korzystnie jest, dobieranie dużej wartości parametru p określającej rząd modelu oraz ograniczanie częstotliwości próbkowania sygnałów;
- metoda nadaje się przede wszystkim do analizy sygnałów stacjonarnych. Wykrywanie i poprawna estymacja składowych, pojawiających się w oknie analizy z opóźnieniem możliwa jest dopiero po precyzyjnym dobraniu rozmiaru modelu.



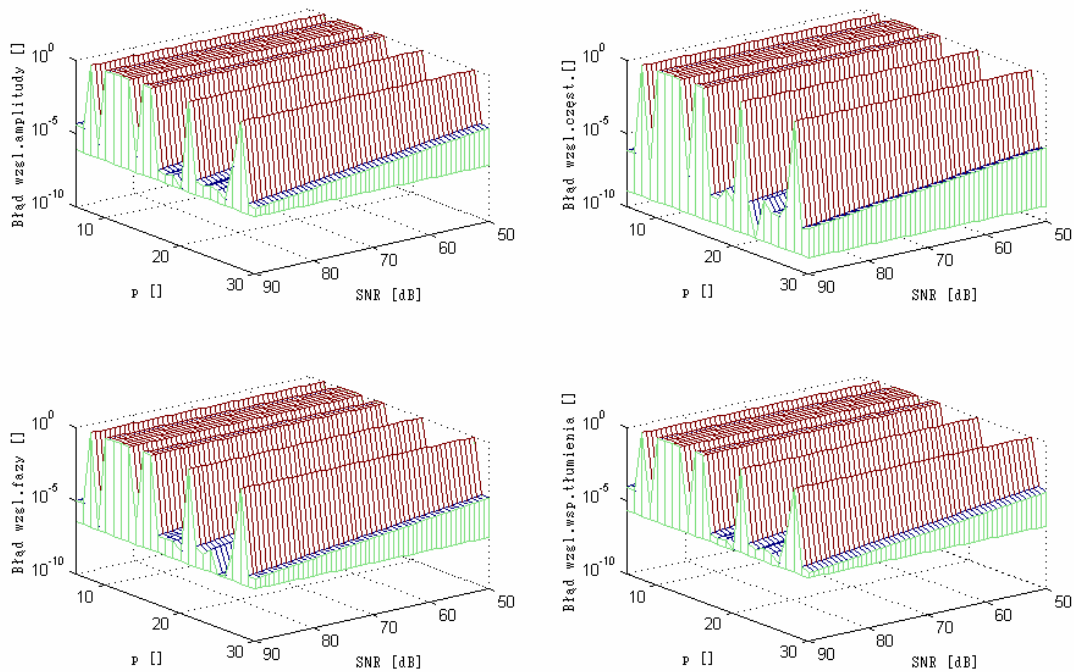
Rys. 5.1. Analiza dokładności wyznaczania parametrów pierwszej składowej eksponencjalnej metodą Prony'ego najmniejszych kwadratów, dla sygnału złożonego ze składowych 1, 2 oraz 3 (tabela 6.1.) (parametr $p=6$), przy założonej szerokości okna analizy $N=256$ próbek i zakłóceniu sygnału szumem białym.



Rys. 5.2. Analiza dokładności wyznaczania parametrów pierwszej składowej eksponencjalnej metodą Prony’ego najmniejszych kwadratów, dla sygnału złożonego ze składowych 1 oraz 2 (tabela 6.2.) (parametr $p=4$), przy założonej szerokości okna analizy $N=256$ próbek, częstotliwości próbkowania $f_s=1\text{kHz}$, zmiennej częstotliwości drugiej składowej f_2 oraz zakłóceniu sygnału szumem białym.



Rys. 5.3. Analiza dokładności wyznaczania parametrów pierwszej składowej eksponencjalnej metodą Prony’ego najmniejszych kwadratów, dla sygnału złożonego ze składowych 1 oraz 2 (tabela 6.2.) (parametr $p=4$), przy założonej szerokości okna analizy $N=256$ próbek, zmiennej częstotliwości drugiej składowej f_2 oraz zakłóceniu sygnału szumem białym $\text{SNR}=70\text{dB}$.



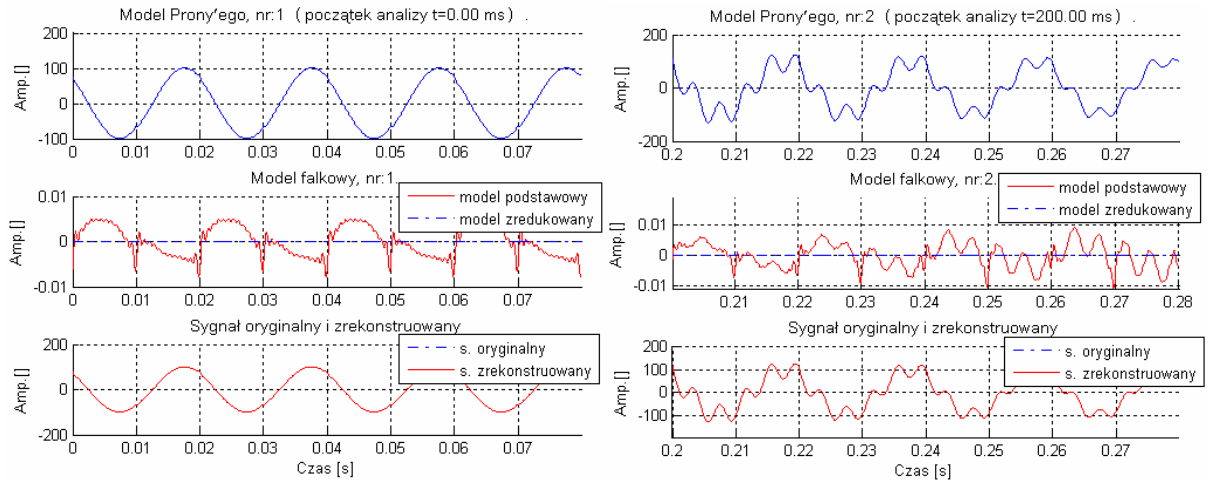
Rys. 5.4. Analiza dokładności wyznaczania parametrów pierwszej składowej eksponencjalnej metodą Prony’ego najmniejszych kwadratów, dla sygnału złożonego ze składowych 1, 2 i 3 (tabela 6.1.), przy założonej szerokości okna analizy $N=256$ próbek, częstotliwości próbkowania $f_s=1\text{kHz}$, dla modelu Prony’ego złożonego z p składowych oraz zmiennym udziale szumu białego w sygnale.

5.2. Analizy przeprowadzone dla połączonych metod Prony’ego oraz falkowej

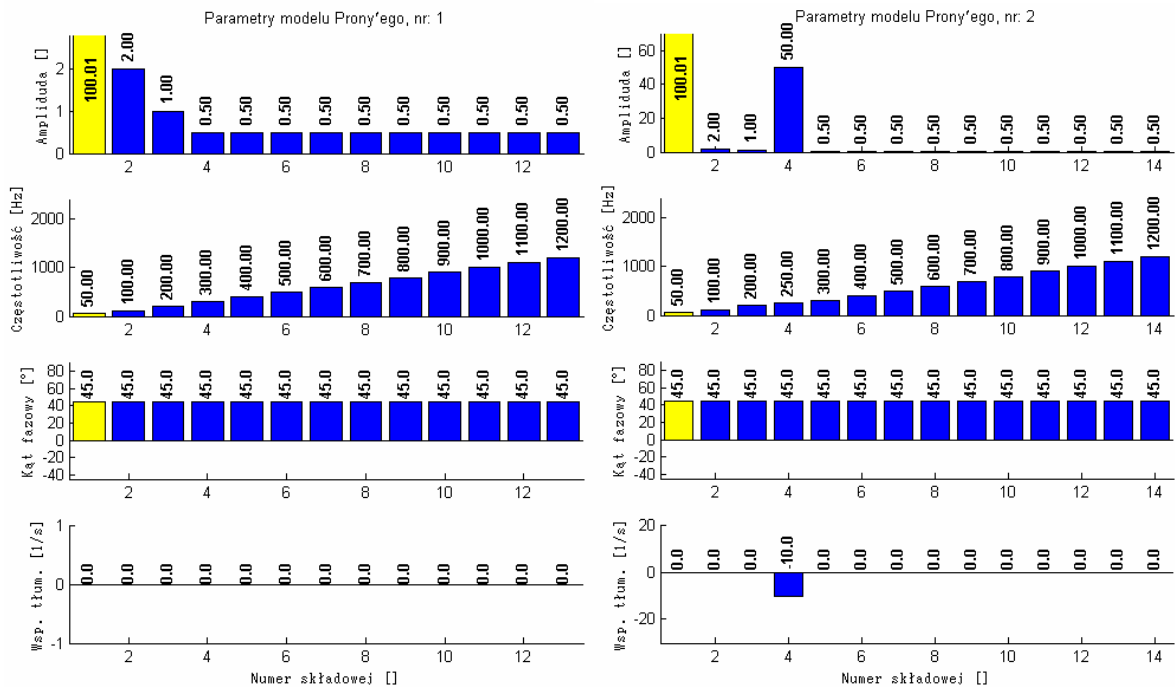
W pierwszym etapie badań algorytmu analizy i kompresji wykorzystującej połączone metody Prony’ego oraz falkową wygenerowano w środowisku Matlab oraz Matlab/Simulink szereg sygnałów testowych. Wszystkie sygnały testowe próbkowane były z częstotliwością 12,8kHz oraz zostały znormalizowane pod względem amplitudy harmonicznej podstawowej (50Hz) do wartości 100,00. Do analiz zastosowano sygnały o długości 0,5 sekundy (6400 próbek). Przebadano ważniejsze grupy sygnałów (zdarzeń) występujących w sieciach elektroenergetycznych.

W kolejnym etapie badań, analizie i kompresji poddano rzeczywiste sygnały o znormalizowanej amplitudzie. Pierwsza seria sygnałów rzeczywistych (Syg_m_01 – Syg_m_05) została zarejestrowana dla trzech różnych sieci niskiego napięcia, w normalnym stanie ich pracy, z częstotliwością próbkowania wynoszącą 12kHz i rozdzielczością 16 bitów. Archiwizację sygnałów wykonano za pomocą modułu z procesorem sygnałowym – TMS320C6713 DSK, firmy Texas Instruments [37], do którego dołączono dzielnik rezystancyjny, w celu dopasowania poziomu rejestrowanego sygnału oraz barierę galwaniczną zabezpieczającą kartę z procesorem. Oprogramowanie do modułu zostało wygenerowane na podstawie modelu utworzonego w Simulinku z wykorzystaniem biblioteki Block Libraries for Embedded Target for Texas Instruments(tm). Druga seria sygnałów (Syg_j_01 – Syg_j_05) została zarejestrowana na stacjach średniego napięcia za pomocą rejestratora firmy Questpol z częstotliwością próbkowania wynoszącą 4kHz i rozdzielczością 16 bitów. Wybrane wyniki analizy i kompresji sygnałów zamodelowanych oraz rzeczywistych (opisanych szerzej w rozprawie) zamieszczono rysunkach 5.5 – 5.10.

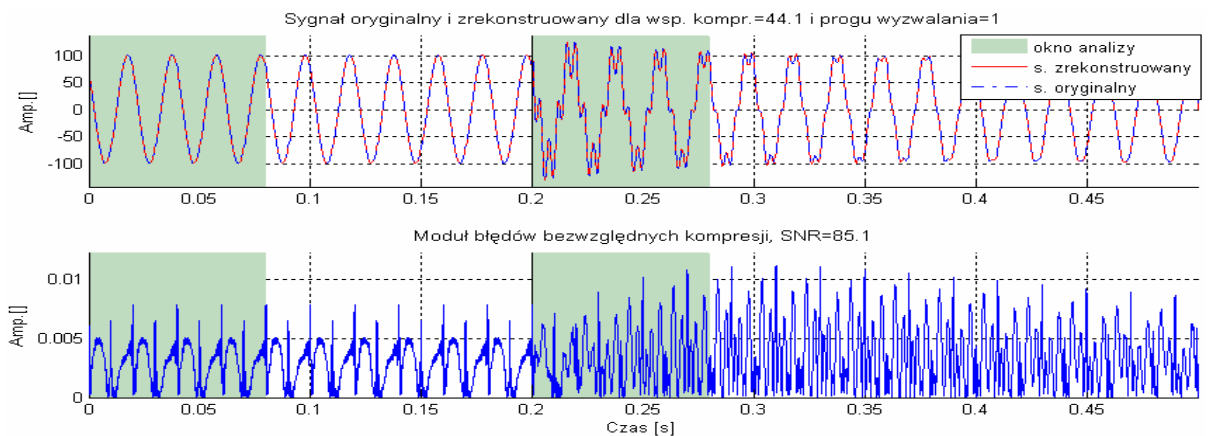
Analiza i kompresja danych pomiarowych sygnału z sieci elektroenergetycznej...



Rys. 5.5. Modele Prony'ego oraz falkowe dla fragmentu sygnału poddanego analizie i rekonstrukcji (sygnał: „Symulacja zdarzenia oscylacyjnego przejściowego nr 1”).

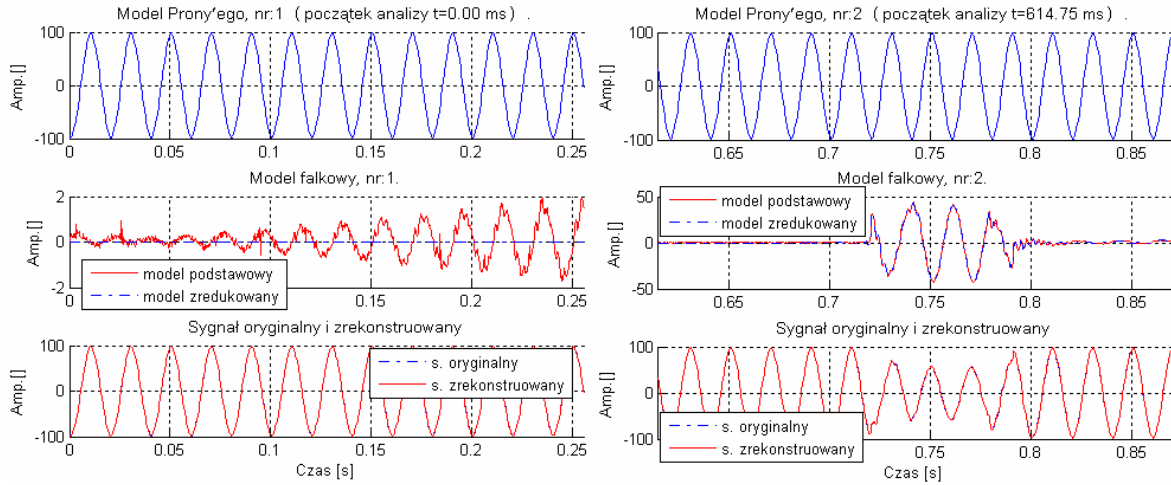


Rys. 5.6. Parametry modeli Prony'ego dla fragmentu sygnału (sygnał: „Symulacja zdarzenia oscylacyjnego przejściowego nr 1”).

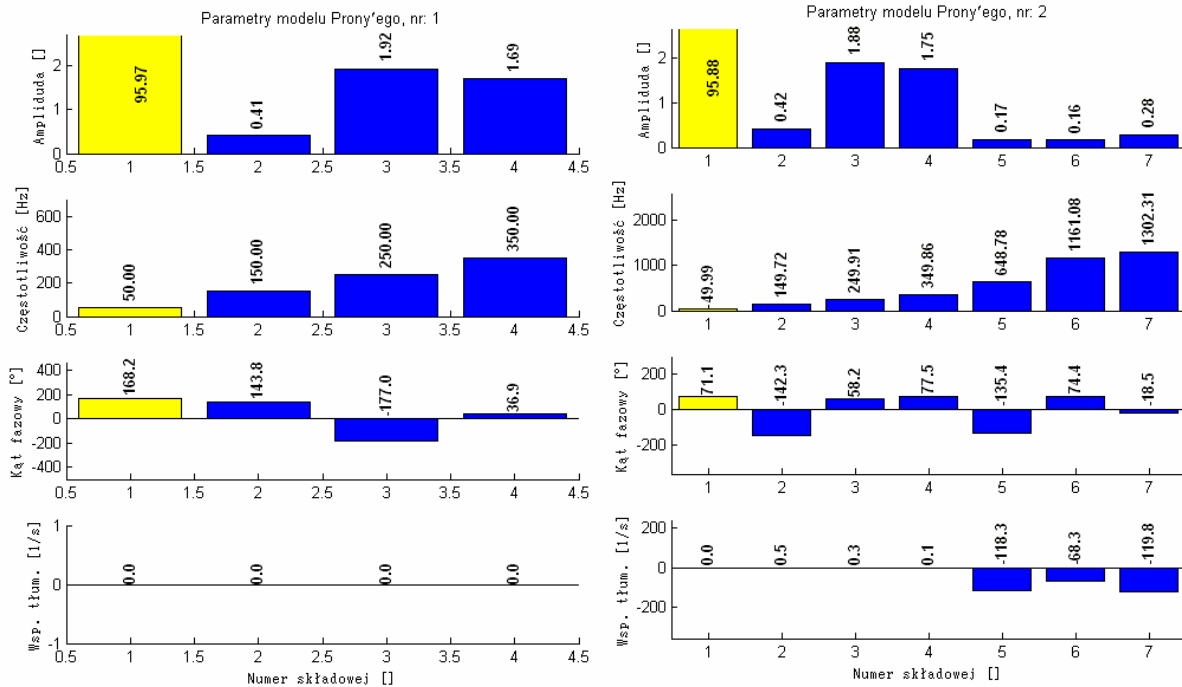


Rys. 5.7. Sygnał oryginalny i zrekonstruowany oraz moduły błędów bezwzględnych kompresji, z zaznaczonymi oknami analizy (sygnał: „Symulacja zdarzenia oscylacyjnego przejściowego nr 1”).

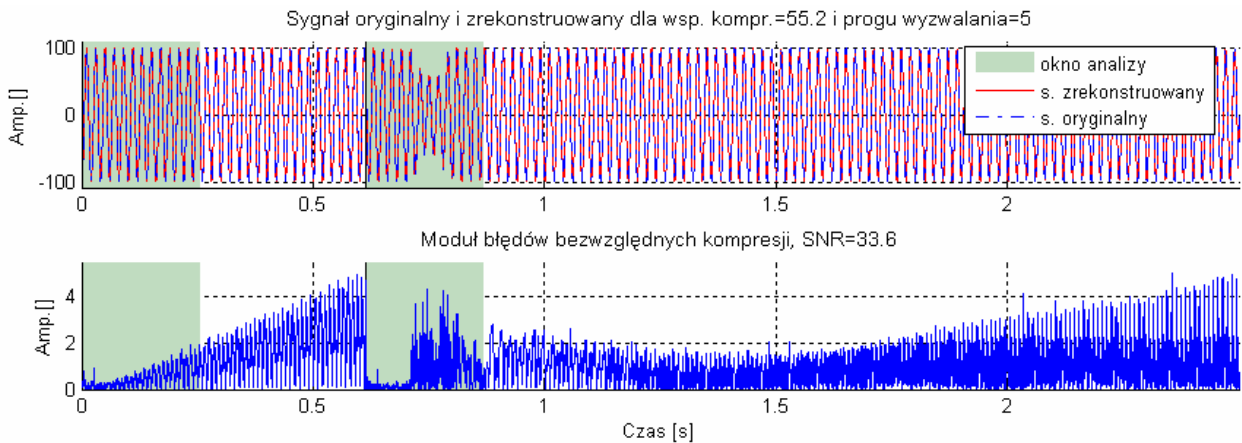
Analiza i kompresja danych pomiarowych sygnału z sieci elektroenergetycznej...



Rys. 5.8. Modele Prony'ego oraz falkowe dla fragmentu sygnału poddanego analizie i rekonstrukcji (sygnał rzeczywisty: „Syg_j_01”).



Rys. 5.9. Parametry modeli Prony'ego dla fragmentu sygnału (sygnał rzeczywisty: „Syg_j_01”).

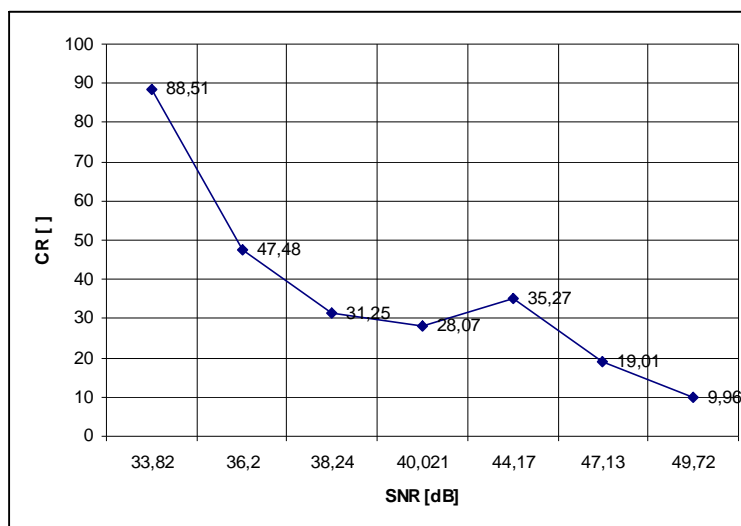


Rys. 5.10. Sygnał oryginalny i zrekonstruowany oraz moduły błędów bezwzględnych kompresji, z zaznaczonymi oknami analizy (sygnał rzeczywisty: „Syg_j_01”).

Rysunek 5.11 przedstawia uśrednioną dla wszystkich badanych sygnałów rzeczywistych zależność współczynnika kompresji CR od błędów rekonstrukcji SNR . Dla porównania prezentowanej metody zamieszczono także wykonane na podstawie przeglądu literaturowego zestawienie parametrów wybranych algorytmów stosowanych do kompresji sygnałów elektroenergetycznych.

Tabela 5.3. Zestawienie parametrów wybranych algorytmów kompresji

Metoda kompresji	SNR [dB]	CR[]
kod. Huffmana	-	2,07
kod. arytmetyczne	-	2,18
LZW	-	2,70
DCT	50,12	7,04
DWT	33,96	8,46
LOT	51,21	8,70
WPT	40,82	10,04
falki + s.neuronowe	24,25	15,00
DWT + Huff.	33,96	20,75
DWT + LZW	33,96	23,36
WPT + Huff.	40,82	24,65
WPT + LZW	40,82	27,78
EDCM	31,56	30,18
WPT + LZH	40,82	30,92
2D-DWT	46,21	32,00



Rys. 5.11. Zależność współczynnika kompresji (CR) od błędów rekonstrukcji (SNR) - wartości średnie dla wszystkich analizowanych sygnałów rzeczywistych.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji wywnioskowano między innymi że:

- badany algorytm dla zakłóceń harmonicznycy wykrył wszystkie składowe sygnałów a parametry wyznaczonych harmonicznycy zostały obliczone z dokładnością mieszczącą się w wymogach normatywnych, dotyczących analizy parametrów jakości energii [76];
- rozbieżności parametrów wyznaczonego modelu Prony'ego z badanym sygnałem można zaobserwować analizując wyniki z dodatkowego członu algorytmu kompresji – członu analizy falkowej, mającego charakter korygujący model Prony'ego;
- prezentowany algorytm może być także stosowany do wyznaczania interharmonicznycy oraz subharmonicznycy zawartych w sygnale elektroenergetycznym;
- błąd lokalizacji w czasie danego zdarzenia zależy od czasu narostu amplitudy zakłócenia do wartości powyżej progu wyzwalania nowej estymacji;
- przy zakłóceniach o charakterze impulsowym model Prony'ego może generować znaczną liczbę wyestymowanych składowych w szerokim zakresie częstotliwości. Wynika to z faktu, że zdarzenia impulsowe posiadają widma o szerokim spektrum częstotliwości. Dokładność modelowania zdarzeń tego typu metodą Prony'ego jest ograniczona do założonego maksymalnego rozmiaru modelu (metoda Prony'ego nie jest odpowiednia do modelowania widm „gładkich”). W takich przypadkach znaczenia nabiera analiza sygnału wykonana dodatkowym modułem falkowym w algorytmie kompresji, która szczególnie dobrze nadaje się do kompresji tego typu sygnałów;

- dzięki zastosowaniu analizy falkowej, możliwe jest poprawne działanie algorytmu, przy nakładających się lub występujących w tym samym oknie zdarzeniach różnego typu;
- algorytm wykrywa zmiany częstotliwości z założoną w normach dokładnością. Płynna zmiana częstotliwości w dość długim czasie (na przykład w całym oknie analizy) powoduje jednak pojawianie się błędów estymacji parametrów, nasilających się znacznie przy większych wartościach wahań częstotliwości;
- przy udziale szumu na poziomie $SNR = 50\text{dB}$ lub większym znacznie zmniejsza się współczynnik kompresji sygnału CR oraz rosną błędy wyznaczania parametrów w modelu Prony'ego;
- prezentowany algorytm umożliwia uzyskanie wysokich współczynników kompresji przy danych błędach rekonstrukcji SNR (rys. 5.11.), w porównaniu z proponowanymi w literaturze algorytmami kompresji sygnałów elektroenergetycznych (tabela 5.3).

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wykorzystanie zaawansowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w analizie oraz kompresji sygnałów z sieci elektroenergetycznych.

W pierwszej części pracy opisano najczęściej spotykane rodzaje zakłóceń występujących w sieciach elektroenergetycznych. Dokonano także zestawienia parametrów jakości energii elektrycznej oraz normalizacji dotyczących opisywanej problematyki.

Kolejna część pracy zawiera skrócony przegląd nowoczesnych metod cyfrowej analizy sygnałów. Przytoczono także obowiązujące obecnie wymogi normatywne stawiane metodom analizy sygnałów, stosowanych do oceny jakości energii elektrycznej.

W następnym rozdziale przedstawiono przegląd rozwijanych aktualnie metod kompresji sygnałów elektroenergetycznych, z uwzględnieniem algorytmów kompresji oraz parametrów poszczególnych metod.

W drugiej części pracy przedstawiono alternatywną do powszechnie stosowanej transformacji Fouriera analizę Prony'ego w zastosowaniu do wyznaczania parametrów jakości energii. Przeanalizowano i porównano właściwości metod Prony'ego w wersji oryginalnej oraz najmniejszych kwadratów. Dodatkowo wskazano interesujące cechy opisanych metod w odniesieniu do analizy fourierowskiej oraz zwrócono uwagę na pewne niedogodności, w praktycznych implementacjach badanej metody (np.: problemy ze złym uwarunkowaniem macierzy).

W następnej części pracy przeanalizowano możliwości zastosowania metody Prony'ego do modelowania sygnału elektroenergetycznego, a następnie na bazie metody Prony'ego najmniejszych kwadratów zaprojektowano algorytm kompresji sygnału, oparty o schemat kompresji typu analiza-synteza.

W kolejnym etapie pracy, po analizie charakteru zakłóceń występujących w sygnałach elektroenergetycznych algorytm rozszerzono o metodę czasowo – częstotliwościowej analizy sygnałów – dyskretną transformację falkową DWT. Zrealizowano implementację programistyczną zaprojektowanej metody w środowisku obliczeniowo – programistycznym Matlab.

W części badawczej pracy przeanalizowano autorską metodę analizy i kompresji, wykorzystującą połączoną metodę Prony'ego najmniejszych kwadratów oraz dyskretną transformację falkową, w zastosowaniu do kompresji sygnałów elektroenergetycznych. Dodatkowo przeanalizowano możliwość wyznaczania parametrów jakości energii elektrycznej.

Zrealizowano badania symulacyjne opracowanej metody obejmujące szereg zamodelowanych zjawisk (zakłóceń) występujących w sieciach elektroenergetycznych takich jak:

harmoniczne, interharmoniczne, zakłócenia oscylacyjne przejściowe, zjawiska impulsowe, zjawiska o charakterze szumowym, zapady, przepięcia itp. Kolejne badania wykonane zostały dla serii sygnałów rzeczywistych w celu ostatecznej weryfikacji funkcjonalności algorytmu.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono przydatność autorskiej metody do kompresji sygnałów elektroenergetycznych. Algorytm umożliwia płynną regulację stosunku współczynnika kompresji CR do błędów rekonstrukcji SNR .

Porównując przedstawione w pierwszej części pracy, rozwijane obecnie metody kompresji sygnałów elektroenergetycznych z przedstawionym algorytmem można uznać ją za metodę o najwyższym współczynniku kompresji, dla pewnego przedziału błędów rekonstrukcji. Wysoki współczynnik kompresji został osiągnięty dzięki zastosowaniu eksponencjalnego modelu sygnału elektroenergetycznego, uzupełnionego o transformację falkową, do modelowania zjawisk o charakterze impulsowym.

Dodatkową zaletą prezentowanej metody jest możliwość obliczania, dzięki modelowaniu Prony'ego, parametrów jakości energii (dotyczy to harmonicznych, interharmonicznych oraz zdarzeń przejściowych). Zauważono jednak sporadycznie pojawiające się problemy z poprawnością wyników metody Prony'ego, występujące dla sygnałów o widmach „gładkich”.

Dzięki prezentowanej metodzie możliwa staje się znaczna redukcja baz sygnałów elektroenergetycznych. Przy użyciu modelowania Prony'ego możliwe jest uzyskanie informacji o parametrach sygnału bezpośrednio z algorytmu kompresji. Ułatwiona jest także identyfikacja oraz lokalizacja charakterystycznych cech zaburzeń, które mogą powodować brak kompatybilności urządzeń podłączonych do danej sieci, z czułymi odbiornikami. Zaburzeń, które przy zastosowaniu klasycznych narzędzi analizy sygnału elektroenergetycznego, takich jak analiza Fouriera, są bardzo często pomijane w wyniku uśredniania w oknie.

Dalsze badania skoncentrują się nad implementacją sprzętową przedstawionego algorytmu. Dzięki temu możliwe będzie między innymi zmniejszenie wymogów dotyczących rozmiarów pamięci (przeznaczonych na dane) instalowanych w urządzeniach monitorujących.

Kolejnym etapem prac może być także implementacja w algorytmie kompresji dodatkowego modułu (na przykład transformacji Wignera-Ville'a), przeznaczonego do modelowania sygnałów o zmieniającej się w czasie częstotliwości (efekt występujący przy gwałtownym zwiększeniu obciążenia sieci elektroenergetycznej).

Należy także rozważyć obok wyzwalania amplitudowego dodanie innych sposobów wyzwalania nowej estymacji parametrów, na przykład wyzwalania poziomem zadanej harmonicznej.

W celu dalszego zwiększenia współczynnika kompresji dla rejestracji sygnałów wielofazowych, należy rozważyć także możliwość wykorzystania korelacji sygnałów pomiędzy poszczególnymi fazami.

7. Literatura

- [1] Angrisani L., Daponte M., D'Apuzzo M., Testa A.: *A Measurement Method Based on the Wavelet Transform for Power Quality Analysis*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.13, No. 4, October 1998, pp. 990-999.
- [2] Assis de Oliveira Nascimento F.: *Data compression algorithm for transient recording system*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1997, ISIE '97, Vol. 3, July 1997, pp. 1126-1130.
- [3] Basu M.; Basu B.: *Application of wavelet transform for power quality (PQ) disturbance analysis*, Power Electronics, Machines and Drives, 2004, pp. 269-273.

- [4] Białasiewicz J.: *Falki i aproksymacje*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- [5] Brito N. S. D., Souza B. A., Pires F. A. C.: *Daubechies Wavelets in Quality of Electrical Power*, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 14-16 October 1998, Athens, pp. 511-515.
- [6] Chaari O., Bastad P., Meunier M.: *Prony's method: An Efficient Tool For The Analysis Of Earth Fault Currents In Petersen-Coil-Protected Networks*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.10, No. 3, July 1995, pp. 1234-1241.
- [7] Chi-Jui Wu, Tsu-Hsun Fu, Chaung-Wei Wu: *Discrete wavelet transform applied to data compression of waveforms with harmonics and voltage flicker*, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, IEEE, Vol. 2, January 2002, pp. 1141-1146.
- [8] Dash P. K., Jena R. K., Panda G., Routray A.: *An extended complex Kalman filter for frequency measurement of distorted signals*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, August 2000, Vol. 49, Iss 4, pp. 746-753.
- [9] Dash P. K., Liew A. C., Salama M. M. A., Mishra B. R., Jena R. K.: *A new approach to identification of transient power quality problems using linear combiners*, Electric Power Systems Research, Jun-1999, Vol. 51, Iss 1, pp. 1-11.
- [10] Dash P. K., Liew A. C., Swain D. P., Mishra B.: *Fast tracking of transient power system signals using fuzzy LMS algorithm*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1998, Vol. 20, Iss 8, pp. 555-561.
- [11] Dash P. K., Mishra B. R., Jena R. K., Liew A. C.: *Estimation of power system frequency using adaptive notch filters*, International Conference on Energy Management and Power Delivery(EMPD 98), 3-5 March 1998, Vol. 1, pp. 143-148.
- [12] Dash P. K., Mishra S., Salama M. M. A., Liew A. C.: *Classification of Power System Disturbances Using a Fuzzy Expert System and a Fourier Linear Combiner*, IEEE Transactions on Power Delivery, April 2000, Vol. 15, No. 2, pp. 472-477.
- [13] Dash P. K., Panigrahi B. K., Sahoo D. K., Panda G.: *Power Quality Disturbance Data Compression, Detection, and Classification Using Integrated Spline Wavelet and S-Transform*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No.2, April 2003, pp. 595-600.
- [14] Dash P. K., Pradhan A. K., Panda G., Jena R. K., Panda S. K.: *On-line tracking of time varying harmonics using an integrated extended complex Kalman filter and Fourier linear combiner*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 23-27 Jan. 2000, Vol.3, pp. 1575-1580.
- [15] Dash P. K., Pradhan A. K., Panda G.: *Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex Kalman filter*, IEEE Transactions on Power Delivery, Jul-1999, Vol. 14, Iss 3, pp. 761-766.
- [16] Dash P. K., Swain D. P., Liew A. C., Rahman S.: *An adaptive linear combiner for on-line tracking of power system harmonics*, IEEE Transactions on Power Systems, Nov-1996, Vol. 11, Iss 4, pp. 1730-1735.
- [17] Donoho D. L., Vetterli M., DeVore R. A., Daubechies I.: *Data compression and harmonic analysis*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 44, No. 6, October 1998, pp. 2435-2476.
- [18] Ece D. G., Gerek Ö. N.: *Power Quality Analysis Using An Adaptive Decomposition Structure*, International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003, New Orleans, USA, pp. 1-5.
- [19] Englert H., Stenzel J.: *Automated classification of Power Quality Events Using Speech Recognition Techniques*, Power Systems Computation Conference - 14th PSCC, Sevilla, 24-28 June 2002, Session 16, Paper 6, pp. 1-7.

- [20] Fahmy M. F., Hasan Y. M. Y.: *Novel Scheme for Compact Orthogonal Modified-Prony Representation of Signals*, IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, 2005, pp. 690-693.
- [21] Fek M., Varkonyi-Kóczy A. R., Boucher J. M.: *Joint Speech and Audio Coding Combining Sinusoidal Modeling and Wavelet Packets*, , EUROSPEECH '2001, Scandinavia, September 2001, pp. 2311-2314.
- [22] Gerek O. N., Ece D. G., Barkana A.: *Covariance analysis of voltage waveform signature for power-quality event classification*, IEEE Transactions on Power Delivery, October 2006, Vol. 21, No. 4, pp. 2022-2031.
- [23] Gerek Ö. N., Ece D. G.: *2-D Analysis and Compression of Power-Quality Event Data*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19 , No. 2 , April 2004, pp. 791-798.
- [24] Gerek Ö. N., Ece D. G.: *A 2D representation for analysis and coding of power quality events*, 2003 International Conference on Image Processing, Vol. 2, September 2003, pp. III - 561-565.
- [25] Gerek Ö. N., Ece D. G.: *An Adaptive Statistical Method For Power Quality Analysis*, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, February 2005, Vol. 54, No. 1, pp. 184-191.
- [26] Gerek Ö. N., Ece D. G.: *Power Quality Event detection using Joint 2D-Wavelet Subspaces*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vail, CO, USA, May-2003, pp. 1460-1464.
- [27] Guo-Sheng Hu, Jing Xie, Feng-Feng Zhu: *Classification of Power Quality Disturbances Using Wavelet and Fuzzy Support Vector Machines*, Proceeding of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, August 2005, pp. 3981-3984.
- [28] Hamid E. Y., Kawasaki Zen-Ichiro: *Wavelet-Based Data Compression of Power System Disturbances Using the Minimum Description Length Criterion*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No.2, April 2002, pp. 460-466.
- [29] Hamid E.Y., Kawasaki Z., Yoshida H., Doi H.: *Wavelet and Wavelet Packet Data Compression of Power System Disturbances*, The Transactions of The Institute of Electrical Engineers of Japan - IEEJ, September 2001 Vol. 121-B, No. 9.
- [30] Hanzelka Z.: *Jakość energii elektrycznej (parametry, pomiary, ocena) wyzwaniem dla automatyki elektroenergetycznej*, Automatyka elektroenergetyczna czynnikiem doskonalenia jakości zasilania i użytkowania energii elektrycznej (Symposium), Wrocław, 27 stycznia 2004, s. 9-30.
- [31] Hanzelka Z.: *Jakość Energii Elektrycznej*, Międzynarodowa Konferencja jubileuszowa z okazji 50 lecia EAIE, Kraków, 7-8 czerwca 2002, s. 65-68.
- [32] Hanzelka Z.: *Podstawowe wymagania w zakresie jakości energii elektrycznej oraz możliwości ich spełnienia*, Wpływ jakości zasilania na koszty energii elektrycznej (Symposium) Lubin 15 listopada 2004, s. 4-25.
- [33] He H., Starzyk J. A.: *A Self-Organizing Learning Array System for Power Quality Classification Based on Wavelet Transform*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006, pp. 286-295.
- [34] Heydt G. T., Fjeld P. S., Liu C. C., Pierce D., Tu L., Hensley G.: *Application of the Windowed FFT to Electric Power Quality Assessment*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999, pp. 1411-1416.
- [35] Hong-Tzer Yang, Chiung-Chou Liao: *A De-Noiseing Scheme for Enhancing Wavelet-Based Power Quality Monitoring System*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 16, No. 3, July 2001, pp. 353-360.
- [36] <http://www.dranetz-bmi.com/>, 2007 – Dranetz-BMI
- [37] <http://www.ti.com/>, 2007 – Texas Instruments

- [38] <http://www.zlib.net/>, 2007 – ZLIB Home Site
- [39] Jun-Zhe Yang, Chih-Wen Liu: *A Precise Calculation of Power System Frequency*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 16, No. 3, July 2001, pp. 361-366.
- [40] Kestin T. S., Karoly D. J., Jun-Ichi Yano, Rayner N. A.: *Time-Frequency Variability of ENSO and Stochastic Simulations*, Journal of Climate: Vol. 11, No. 9, pp. 2258-2272.
- [41] Kim H. Lee J. Choi J., Lee S. Kim J.: *Power Quality Monitoring System Using Wavelet-Based Neural Network*, International Conference on Power System Technology – POWERCON, November 2004, pp. 453-458.
- [42] Koglin H. J., Leonowicz Z., Łobos T.: *High-Resolution Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Power Systems*, IFAC Conference on Technology Transfer in Developing Countries-Automation in Infrastructure Creation CECOM –TT 2000, 5-7 July 2000, Pretoria, South Africa, pp. 98-103.
- [43] Lelewer D. A., Hirschberg D.S.: *Data compression*. ACM Computing Surveys, 1987, Vol. 19, No. 261.
- [44] Leonowicz Z., Łobos T., Rezmer J.: *Spectrum Estimation of Non-Stationary Signals in Power Systems*, International Conference on Power System Transients - IPST 2003, New Orleans, USA, 2003.
- [45] Leonowicz Z., Łobos T., Schegner P.: *Modern Spectral Analysis of Non-Stationary Signals in Electrical Power Systems*, 14th Power System Computation Conference. PSCC, Sevilla, Spain, June 24-28 2002.
- [46] Leonowicz Z., Łobos T., Woźniak K.: *Analysis Of Nonstationary Electric Signals Using The S-Transform*, Międzynarodowa konferencja z podstaw elektrotechniki i teorii obwodów – IC-SPETO, 2005, s. 379-382.
- [47] Leonowicz Z., Łobos T.: *Analysis of Three Phase Signal Using Wigner Spectrum*, XVI International Measurement Confederation World Congress, 25-28 September 2000, Vienna, Austria, pp. 215-220.
- [48] Leonowicz Z., Łobos T.: *Time-Frequency Analysis of Non-Stationary Three Phase Signals*, 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
- [49] Littler T. B., Morrow D. J.: *Wavelets for the Analysis and Compression of Power System Disturbances*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 14, No. 2, April 1999, pp. 358-365.
- [50] Lorio F., Magnago F.: *Analysis of data compression methods for power quality events*, Power Engineering Society General Meeting, 2004, IEEE, Vol. 1, June 2004, pp. 504-509.
- [51] Lovisolto L., da Silva E. A. B., Rodrigues M. A. M. Diniz P. S. R.: *Efficient Coherent Adaptive Representations of Monitored Electric Signals in Power Systems Using Damped Sinusoids*, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 53, No. 10, October 2005, pp. 3831-3846.
- [52] Łobos T., Kozina T., Koglin H.-J.: *Power System Harmonics Estimation Using Linear Least Squares Method and SVD*, 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 24-26 May 1999, Venice, Italy, pp. 789-794.
- [53] Łobos T., Kozina T., Leonowicz Z.: *Advanced Signal Processing Methods of Harmonic Analysis in Power Systems*, IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control 2000, 26-29 April 2000, Brussels, Belgium, pp. 197-200.
- [54] Łobos T., Kozina T., Leonowicz Z.: *High Resolution Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Power Electronics and Systems*, The 2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 18-31 May 2000, Geneva, Switzerland, pp. 553-556.

- [55] Łobos T., Kozina T., Osowski S.: *Detection of Remote Harmonics Using SVD*, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 14-16 October 1998, Athens, Greece, pp. 1136-1140.
- [56] Łobos T., Leonowicz Z., Rezmer J., Koglin H. J.: *Advanced signal processing methods of harmonics and interharmonics estimation*. 7th International Conference on Developments in Power System Protection, 9-12 April 2001, Amsterdam, pp. 315-318.
- [57] Łobos T., Leonowicz Z., Rezmer J., Koglin H. J.: *Advanced signal processing methods of harmonics and interharmonics estimation*. 7th International Conference on Developments in Power System Protection, 9-12 April 2001, Amsterdam, pp. 315-318.
- [58] Łobos T., Leonowicz Z., Rezmer J., Koglin H.-J.: *Advanced Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Electrical Engineering*, 11th International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, 19-22 August 2001, Linz, Austria.
- [59] Łobos T., Leonowicz Z., Rezmer J.: *Advanced Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Power Electronics*, The 2001 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives – SDEMPED 2001, 1-3.09.2001, Grado, Italy, pp. 333-337.
- [60] Łobos T., Leonowicz Z., Rezmer J.: *Harmonics and Interharmonics Estimation Using Advanced Signal Processing Methods*, 9th Conference on Harmonics and Quality of Power, 1-4 October 2000, Orlando, Florida USA, pp. 335-340.
- [61] Łobos T., Rezmer J., Koglin H. J.: *Analysis of Power System Transients Using Wavelets and Prony Method*, 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings, 10-13 September 2001, Porto, Portugal.
- [62] Łobos T., Rezmer J., Schegner P.: *Frequency Analysis of Distorted Signals Using Prony Method*, 12th International Conference on Power System Protection, 27-29 September 2000, Bled, Slovenia, pp. 91-96.
- [63] Łobos T., Rezmer J.: *Analiza spektralna sygnałów z zastosowaniem modelu Prony'ego*, Krajowy Kongres Metrologii – KKM 2001, 24-27 czerwca 2001, Warszawa, s. 243-246.
- [64] Łobos T.: *Advanced Spectrum Estimation Methods for Signal Analysis in Power Electronics and Systems*, 6th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 19-21 September 2001, Cracow, Poland, pp. 35-48.
- [65] Łobos T.: *Analiza częstotliwościowa zniekształconych sygnałów w systemie elektroenergetycznym*, XXIII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, 24-27.05.2000, Gliwice – Ustroń, s. 229-232.
- [66] Łobos T.: *Zaawansowane metody przetwarzania sygnałów w elektrotechnice*, XXIV Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, 23-26.05.2001, Gliwice – Ustroń, s. 7-17.
- [67] Marple S., Lawrence Jr.: *Digital Spectral analysis*, Prentice Hall PTR, New Jersey 1987.
- [68] Meher S. K., Pradhan A. K., Panda G.: *An integrated data compression scheme for power quality events using spline wavelet and neural network*, Electric Power Systems Research, Vol. 69, Issues 2-3, May 2004, pp. 213-220.
- [69] Mehta K., Russell B. D.: *Data compression for digital data from power systems disturbances: requirements and technique evaluation*, Transactions on Power Delivery, IEEE, Vol. 4, Iss. 3, July 1989, pp. 1683-1688.
- [70] Meunier M., Brouaye F.: *Fourier Transform, Wavelets, Prony analysis: Tools for Harmonics and Quality of Power*, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 14-16 October 1998, Athens, pp. 71-76.

- [71] Mieński R., Pawełek R., Wasiak I.: *Jakość energii elektrycznej – parametry, pomiary i ocena*, Zaburzenia w napięciu zasilającym (Seminarium), Łódź 9 czerwca 2003, s. 33-58.
- [72] Min Wang, Mamishev A. V.: *Classification of power quality events using optimal time-frequency representations-Part 1: theory*, IEEE Transactions on Power Delivery, July 2004, Vol. 19, No. 3, pp. 1488-1503.
- [73] Ming-Tang Chen, Sakis Meliopoulos A. P.: *Wavelet-based Algorithm for Voltage Flicker Analysis*, 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1-4 October 2000, Orlando, Florida USA, pp. 732-738.
- [74] norma IEEE 1159.3: *IEEE Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data*.
- [75] norma PN-EN 50160: *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*.
- [76] normy PN-EN seria 61000-x-x: *Kompatybilność elektromagnetyczna*.
- [77] Osborne M. R., Smith G. K.: *A Modified Prony Algorithm For Exponential Function Fitting*, SIAM Journal on Scientific Computing, 1995, Vol. 16, No. 1, pp. 119-138.
- [78] Painter T., Spanias A.: *Perceptual Coding of Digital Audio*, Proceeding Of The IEEE, April 2000, Vol. 88 No. 4, pp. 451-513.
- [79] Palmer E.: *The Use of Prony Analysis to Determine the Parameters of Large Power System Oscillations*, Australian Universities Power Engineering Conference AUPEC 2002, 29 September – 2 October 2002, Melbourne, Australia.
- [80] Panda G., Dash P. K., Pradhan A. K., Meher S. K.: *Data Compression of Power Quality Events Using the Slantlet Transform*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, pp. 662-667.
- [81] Perunicic B., Mallini M., Wang Z., Liu Y.: *Power Quality Disturbance Detection and Classification Using Wavelets and Artificial Neural Networks*, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 14-16 October 1998, Athens, pp. 77-82.
- [82] Poisson O., Rioual P., Meunier M.: *Detection and Measurement of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform*, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 14-16 October 1998, Athens, pp. 1125-1130.
- [83] Półchłopek W., Ziółko M.: *Wavelet transform compression and denoising in real-time system*, Proceedings of third international symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing, CSNDSP 2002 : July 2002, Staffordshire, UK, s. 288–291.
- [84] Przelaskowski A.: *Kompresja danych. Podstawy, metody bezstratne, kodery obrazów*. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2005.
- [85] Ramos, F. R., Riberto, M. V., Romano, J. M. T., Duque, C. A.: *On signal processing approach for event detection and compression applied to power quality evaluation*, 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2002, Vol. 1, pp. 133-138.
- [86] Ribeiro M. V., Duque C. A., Romano J. M. T.: *An enhanced data compression method for applications in power quality analysis*, in Proc. 2001 27th Annu. IEEE Industrial Electronics Society Conf., pp. 676-681.
- [87] Ribeiro M. V., Mitra S. K., Romano J. M. T.: *Digital Signal Processing Techniques for Compression of Power Quality Disturbance Events: New Results*, 2004 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, pp. 448-452.
- [88] Ribeiro M. V., Park S. H., Romano J. M. T, Mitra S. K.: *A Novel MDL-based Compression Method for Power Quality Applications*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, January 2007, pp. 27-36.

- [89] Ribeiro M. V., Romano J. M. T., Duque C. A.: *An Improved Method for Signal Processing and Compression in Power Quality Evaluation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No.2, April 2004, pp. 464-471.
- [90] Robert A.: *Power Quality at the Interface Between Transmission System and Users*, 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1-4 October 2000, Orlando, Florida USA, pp. 425-430.
- [91] Robertson D. C., Camps O. I., Mayer J. S., Gish W. B.: *Wavelets and Electromagnetic Power System Transients*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 1050-1058.
- [92] Rosa Ma de Castro Fernández, Horacio Nelson Díaz: *An Overview of Wavelet Transforms Application in Power Systems*, 14th PSCC, 24-28 June 2002, Sevilla, Session 01, Paper 6, Page 1.
- [93] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 20 grudnia 2004 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci (Dz.U. z 2005 r. nr 2, poz. 6).
- [94] Ruiz-Reyes N., Vera-Candeas P., Jurado F.: *Discrimination Between Transient Voltage Stability and Voltage Sag Using Damped Sinusoid-Based Transient Modeling*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, No. 4, October 2005, pp. 2644-2649.
- [95] Santoso S., Bingham R. P.: *Advances in data reduction techniques for power quality instrumentation*, Proceeding of the Third European Power Quality Conference, Germany 1995.
- [96] Santoso S., Powers E. J., Grady W. M.: *Power Quality Disturbance Data Compression using Wavelet Transform Methods*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, July 1997.
- [97] Sayood K.: *Kompresja danych wprowadzenie*. Wydawnictwo RM, Warszawa 2002.
- [98] Shannon C. E.: *A Mathematical Theory of Communication*. Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, 1948.
- [99] Soon-Ryul Nam, Sang-Hee Kang, Jong-Keun Park: *An Analytic Method For Measuring Accurate Fundamental Frequency Components*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol.17, No. 2, April 2002, pp. 405-411.
- [100] Spanias A. S.: *Speech Coding: A Tutorial Review*, Proceeding Of The IEEE, October 1994, Vol. 82, No. 10., pp. 1541-1582.
- [101] Stranneby Dag.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2004.
- [102] Styvaktakis E., Bollen M. H. J., Gu I. Y. H.: *Expert System For Classification And Analysis Of Power System Events*, IEEE Transactions on Power Delivery, April 2002, Vol. 17, No. 2, pp. 423-428.
- [103] Urbański K.: *Redukcja Strumienia danych pomiarowych w rejestratorach parametrów sieci energetycznej*, II Konferencja Naukowa KNWS'05, czerwiec 2005, Złotniki Lubańskie, s. 235-240.
- [104] Wael R. I., Medhat M. M.: *Novel Data Compression Technique for Power Waveforms Using Adaptive Fuzzy Logic*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No.3, July 2005, pp. 2136-2143.
- [105] Wilkinson W. A., Cox M. D.: *Discrete Wavelet Analysis of Power System Transients*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol.11, No. 4, November 1996, pp.2038-2044.
- [106] www.elspec-ltd.com, 2006 – PQZip Data Compression Technology for Power Quality Analysis.
- [107] Xianfeng H., Yunping C.: *Wavelet based data compression technique in fault location using travelling wave signal*, International Conference on Power System Technology 2002. Proceedings. PowerCon 2002, Vol. 2, October 2002, pp. 1132-1136.

- [108] Ying-Tung Hsiao, Cheng-Long Chuang, Joe-Air Jiang: *Recognition of power quality events using wavelet-based dynamic structural neural networks*, Circuits and Systems, 2005, pp. 3886-3888.
- [109] Zhang Zhaoning, Zhang Yigang, Fan Chunju, Yu Weiyong, Luo Jianxu, Mao Peng: *Power system fault data compression based on wavelet packet transform and vector quantization*, International Conference on Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002, Vol. 4, October 2002, pp. 2600-2603.
- [110] Zheng T., Makram E.B., Girgis A.A.: *Power System Transient and Harmonic Studies using Wavelet Transform*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999, pp. 1461-1467.
- [111] Zieliński T. P.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów – Od teorii do zastosowań*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2005.
- [112] Zieliński T.: *Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów*, Wydział EAIiE AGH, Kraków 2002.
- [113] Zieliński T.: *Reprezentacje sygnałów niestacjonarnych typu czas-częstotliwość i czas-skala*, Rozprawy monograficzne 10, Wydawnictwa AGH, Kraków 1994.

Publikacje własne lub współautorskie autora

- [114] Zygarlicki J., Stanisławski R.: *Analiza metod kompresji sygnału EKG*, Modelowanie i Pomiary w Medycynie 2004, s. 99-102.
- [115] Zygarlicki J., Muciek A.: *Komputerowy system do monitorowania analizy i archiwizacji sygnałów EKG*, Zeszyt Elektryka P.O. z.54, Nr 297/2004, s. 5-30.
- [116] Zygarlicki J.: *Zastosowanie ortonormalnych funkcji bazy do kompresji sygnału EKG*, Kongres Metrologii 2004, s. 317-320.
- [117] Szmajda M., Zygarlicki J., Górecki K.: *Filtr antyaliasingowy w systemach pomiarowych jakości energii elektrycznej*, Zeszyt Elektryka P.O. z.53, Nr 295/2004, s. 551-559.
- [118] Stanisławski W., Rydel M., Zygarlicki J.: *Problemy redukcji modeli parownika kotła BP-1150*, Systems 2004, Vol. 9, s. 908-915.
- [119] Zygarlicki J., Szmajda M.: *Transformacja Wignera-Ville'a w zastosowaniach do oceny jakości kompresji stratnej sygnału EKG*, Zeszyt Informatyka P.O. z. 2, Nr 302/2005, s. 31-42.
- [120] Zygarlicki J., Mroczka J.: *Sposób doboru metod kompresji dla sygnałów z sieci elektroenergetycznej*, Pomiary Automatyka Kontrola (PAK), Nr 10/2006, s. 35-38.
- [121] Zygarlicki J., Mroczka J.: *Data Compression Using Prony's Method and Wavelet Transform in Power Quality Monitoring Systems*, Metrology and Measurement Systems (MAMS), Vol. XIII, No. 3 (2006), pp. 237-251.

Inne osiągnięcia

Współrealizacja projektów:

1. System monitorowania zużycia energii elektrycznej – Data Logger (PMT), Politechnika Opolska, 2004 r.
2. System monitorowania parametrów jakości energii elektrycznej oraz rejestracji sygnałów elektroenergetycznych w oparciu o procesor sygnałowy TMS320C6713. Projekt opracowany dla firmy ZAE (Wrocław), 2006 r.