



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,  
INFORMATYKI I ELEKTRONIKI



Katedra Metrologii

Autoreferat rozprawy doktorskiej

## Miary wahania napięcia w sieci elektroenergetycznej wyznaczone z zastosowaniem transformacji Hilberta

mgr inż. Andrzej Wetula

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Bień

### 1 Wstęp

Analiza jakości energii elektrycznej jest konieczna dla poprawnej pracy systemów elektroenergetycznych. Jednocześnie jest ona wiarygodna tylko pod warunkiem zastosowania odpowiednich narzędzi, w postaci aparatury oraz algorytmów pomiarowych. Szczególnym rodzajem zaburzeń jakości energii elektrycznej są zaburzenia niskoczęstotliwościowe. Obecnie do ich analizy stosuje się miernik migotania światła, opisany w normie [8], oraz związane z jego strukturą miary  $P_{st}$  i  $P_{lt}$ . Miernik ten ma istotne wady, ograniczające, zdaniem autora, jego użyteczność jako przyrządu do analizy jakości energii. Został on opracowany przy założeniach, że zaburzenia niskoczęstotliwościowe można modelować jako modulację amplitudy napięcia, oraz że ich głównym rezultatem jest migotanie źródeł światła. W powstałych z udziałem autora publikacjach [2, 1] wykazano, że zaburzenia niskoczęstotliwościowe mają charakter modulacji zespolonej, tj. jednoczesnej modulacji amplitudy i fazy. Zaproponowano też model takiej modulacji. Z tego względu należy odstąpić od konstrukcji miernika migotania. Dodatkowym argumentem za takim posunięciem jest możliwość uniezależnienia się od modelu obciążenia. Dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie do demodulacji algorytmu opartego na transformacji Hilberta, i zbudowanie miar zmienności operujących na sygnale obwiedni zespolonej. Prowadzi to do sformułowania następującej tezy:

**Zastosowanie transformacji Hilberta umożliwi wyznaczenie efektywnych i wrażliwych miar zmienności napięcia oraz impedancji zastępczych w sieci elektroenergetycznej.**

Przy czym przez efektywność rozumiana jest efektywność obliczeniowa, wystarczająca do prowadzenia analizy na bieżąco, a przez wrażliwość – zdolność do rozróżniania małych zmian zaburzenia. Impedancje zastępcze wspomniane w tezie to impedancje zastępcze modelu Thevenina. Ich znajomość jest użyteczna przy analizie propagacji zaburzeń oraz podatności systemu na zaburzenia wprowadzane przez zmiany obciążeń w punkcie pomiaru.

### 2 Proponowane miary wahania

Zaproponowane w rozprawie miary wahania zostały opracowane przy następujących założeniach:

- działanie na sygnale obwiedni zespolonej (uwzględnienie wahania fazy i uniezależnienie od algorytmu demodulacji),

- obiektywizm, rozumiany jako brak nawiązań do konkretnego rodzaju obciążenia,
- wysoka wrażliwość, pozwalająca wykryć niewielkie zmiany zaburzenia,
- duży zakres, pozwalający na uzyskiwanie poprawnych wyników przy znacznych zaburzeniach,
- efektywność obliczeniowa pozwalająca na pracę w czasie rzeczywistym,
- możliwość budowy skali interwałowej.

Przedstawiono i przebadano cztery miary skalarne (jednowartościowe) i dwie miary wektorowe (dwuwartościowe). Wszystkie zaproponowane miary operują na sygnale obwiedni zespolonej. Zaproponowane miary oznaczono  $M_1 - M_6$ . Miary skalarne są opisane równaniami:

$$M_1 = \frac{1}{T_o} \sum_{n=0}^{N-1} |\bar{u}(n+1) - \bar{u}(n)| \quad (1)$$

$$M_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N |\bar{u}(n) - \bar{U}_M|^2} \quad (2)$$

$$M_3 = \sup_{n \in N} |\bar{u}(n) - \bar{U}_M| \quad (3)$$

$$M_4 = \sup_{n \in N} |\bar{u}(n) - \bar{U}_z| \quad (4)$$

Przy czym  $M_1$  jest zespolonym odpowiednikiem funkcjonu wahania,  $M_2$  odchyleniem standardowym obwiedni zespolonej,  $M_3$  maksymalną odchyłką obwiedni zespolonej od średniej, a  $M_4$  średnicą okrągłego obszaru zawierającego punkty obwiedni rzutowane na płaszczyznę zespoloną. Miary wektorowe składają się z dwóch miar skalarnych, wyznaczanych oddzielnie dla sygnału amplitudy i fazy obwiedni zespolonej. Są one opisane równaniami:

$$M_{5m} = \sup_{n \in N} |u_m(n) - U_{Mm}| \quad (5)$$

$$M_{5p} = \sup_{n \in N} |u_p(n) - U_{Mp}| \quad (6)$$

$$M_{6m} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (u_m(n) - U_{Mm})^2} \quad (7)$$

$$M_{6p} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (u_p(n) - U_{Mp})^2} \quad (8)$$

Można zauważyć, że miara  $M_5$  jest wektorowym odpowiednikiem miary  $M_2$ , a miara  $M_6$  – wektorowym odpowiednikiem miary  $M_3$ .

## 2.1 Badanie Miar

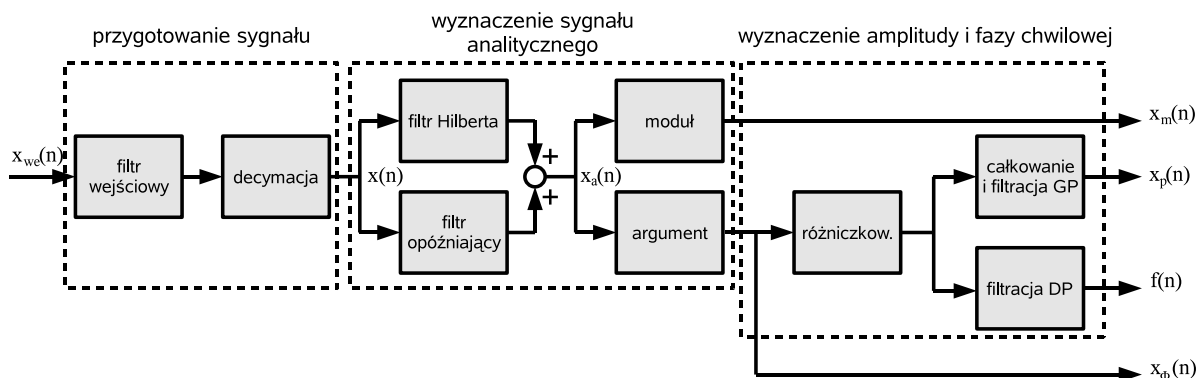
Badanie miar polegało na wyznaczeniu ich charakterystyk statycznych, przedstawiających wartości miary w funkcji amplitudy i częstotliwości zmian amplitudy i fazy badanej obwiedni. Na podstawie wyznaczonych charakterystyk określono wrażliwość małosygnalową pochodną kierunkową wartości miary  $M$  po zmiennym parametrze wejściowym  $p$  [7, 6]. Poza wyznaczeniem charakterystyk statycznych, sprawdzono spełnienie aksjomatów miar, oszacowano konieczny dla ich wyznaczenia nakład obliczeń oraz przeanalizowano działanie miar przy przesuwaniu okna analizy z próbki na próbkę. Ponieważ zaprezentowane miary operują na sygnale obwiedni zespolonej, konieczne jest uzupełnienie ich o algorytm demodulacji sygnałów systemu elektroenergetycznego. Został on przedstawiony w następnjej części rozprawy.

### 3 Algorytm detekcji obwiedni zespolonej

Algorytm detekcji obwiedni zespolonej został oparty na transformacji Hilberta. Jest ona wykorzystana do budowy sygnału analitycznego, którego składowe służą jako sygnały wejściowe dla estymacji obwiedni zespolonej badanego sygnału. Algorytm został zbudowany do detekcji obwiedni zespolonej zarówno napięcia, jak i prądu sieci elektroenergetycznej. Oznacza to, że przy realizacji części elementów algorytmu wykorzystano znajomość właściwości tych sygnałów. Ogólne założenia dotyczące algorytmu są następujące:

- możliwie płaska charakterystyka amplitudowa w badanym paśmie,
- stałe opóźnienie grupowe (liniowa charakterystyka fazowa),
- mała niepewność wyznaczania obwiedni zespolonej.

Spełnienie drugiego założenia w praktyce ograniczyło dobór stosowanych filtrów jedynie do filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej. Założenie trzecie z kolei wymusiło znaczne opóźnienia i dużą złożoność algorytmu, co odróżnia go od algorytmów stosowanych w automatyce zabezpieczeniowej.[3, 4]. Schemat blokowy zaproponowanego algorytmu przedstawia rysunek 1. Algorytm składa się z trzech elementów. Pierwszy z nich, przygotowanie sygnału, obejmuje fil-



Rysunek 1: Schemat blokowy algorytmu detekcji obwiedni sygnałów sieci elektroenergetycznej

trację dolnoprzepustową i decymację. Operacje te mają na celu ograniczenie pasma sygnału do obszaru będącego przedmiotem analizy, oraz pozbycie się nadmiaru danych, mogącego utrudniać dalsze obliczenia. Dodatkowo zastosowanie stałej częstotliwości dyskretyzacji w dalszej części algorytmu pozwala w prosty sposób przystosować go do analizy sygnałów spróbkowanych z różnymi częstotliwościami. Drugi element algorytmu obejmuje wyznaczenie sygnału analitycznego oraz zmianę układu współrzędnych dla uzyskania sygnałów amplitudy chwilowej i fazy uogólnionej. Do wyznaczenia sygnału analitycznego wykorzystano parę filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej, przy czym jeden z nich pełni rolę transformatora Hilberta, a drugi jest filtrem opóźniającym. Charakterystyki obu filtrów ukształtowano tak, aby prznosiły one sygnał jedynie w paśmie badanym. Dzięki temu filtry te stanowią uzupełnienie filtrów bloku wejściowego. Trzecim elementem algorytmu jest wyznaczenie obwiedni zespolonej na podstawie składowych sygnału analitycznego. O ile amplituda chwilowa sygnału analitycznego odpowiada amplitudzie obwiedni zespolonej, to na sygnał fazy uogólnionej wpływają dwie wielkości: częstotliwość systemu oraz faza chwilowa. Częstotliwość systemu jest związana z pracą węzłów wytwórczych, i w danej chwili przyjmuje takie same wartości na prawie całym obszarze systemu. Składowa fazy uogólnionej pochodząca od częstotliwości systemu ma w przybliżeniu charakter liniowo narastający. Druga składowa fazy uogólnionej pochodzi od fazy chwilowej. Mianem tym określa się w pracy wahania fazy pochodzące od zmian parametrów odbiorników. Mają one charakter szybkich zmian,

występujących lokalnie. Fakt zajmowania różnych pasm częstotliwościowych wykorzystano w rozprawie do rozdzielania składowych fazy uogólnionej. W celu ich wyznaczenia obliczana jest pochodna fazy uogólnionej. Jej składową dolnopasmową uznaje się za częstotliwość systemu, a estymatę całki składowej górnopasmowej za fazę chwilową. Do filtracji częstotliwości systemu zaproponowano okno hiperboliczne [5] o długości 10 sekund. W odróżnieniu od średniej bieżącej, będącej najbardziej dosłownym przybliżeniem metody z normy [9], okno hiperboliczne pozwala znacznie zwiększyć tłumienie wyższych częstotliwości, a tym samym przenikanie sygnału fazy chwilowej do częstotliwości systemu. Mankamentem okna hiperbolicznego jest szersze pasmo przenoszenia.

Zaprezentowany algorytm został zaimplementowany na dwóch platformach sprzętowych: zmienno-przecinkowym procesorze sygnałowym TMS320C6713, oraz w kasecie pomiarowej PXI z kontrolerem opartym o architekturę PC. Przeprowadzone badania pozwoliły wykazać możliwość zastosowania algorytmu do analizy sygnałów na bieżąco („on-line”) na obu platformach.

Wyniki badania algorytmu detekcji obwiedni zespolonej oraz operujących na tej obwiedni miar pozwoliły potwierdzić pierwszą część tezy, mówiącą o wykorzystaniu transformacji Hilberta do wyznaczania miar zmienności napięcia sieci elektroenergetycznej.

## 4 Estymacja impedancji zastępczych

Jako przykład innego niż analiza wahania zastosowania algorytmu detekcji obwiedni zaprezentowano estymację parametrów modelu Thevenina systemu elektroenergetycznego. Wykorzystanie wyznaczonych obwiedni napięcia i prądu umożliwia przeprowadzenie estymacji impedancji zastępczych w drodze eksperymentu biernego. Eksperyment taki wykorzystuje jako pobudzenie naturalną zmienność obciążeń w punkcie pomiaru, bez ingerencji w działanie systemu. Pozwala on dokonać analizy niskim kosztem i w najmniej uciążliwy dla odbiorców sposób, jednakże wymuszenie może okazać się zbyt małe dla uzyskania zadowalająco niskiej niepewności pomiaru. W rozprawie zaproponowano wykorzystanie jednej z przedstawionych wcześniej miar zmienności do detekcji zmienności obciążenia, i odrzucania niewiarygodnych wyników.

Impedancję obciążenia modelu Thevenina można wyznaczyć z definicji, wykorzystując amplitudę chwilową i fazę uogólnioną napięcia i prądu, wyznaczone z wykorzystaniem zaprezentowanego algorytmu:

$$\hat{Z}_{lm}(m) = \frac{U_m \hat{(m)}}{I_m \hat{(m)}} \quad (9)$$

$$\hat{Z}_{lp}(m) = \hat{U}_\Psi(m) - \hat{I}_\Psi(m) \quad (10)$$

Gdzie  $\hat{Z}_{lm}(m)$  jest estymatą modułu, a  $\hat{Z}_{lp}(m)$  estymatą fazy impedancji obciążenia wyznaczonej z m-tej próbki estymat obwiedni zespolonych napięcia i prądu. Do wyznaczania impedancji źródła w eksperymencie biernym konieczne jest wykorzystanie przyrostów wartości napięcia i prądu pomiędzy poszczególnymi próbkami lub wybranymi chwilami. W rozprawie zaproponowano wykorzystanie metody najmniejszych kwadratów do rozwiązania nadokreślonego równania modelu Thevenina, zbudowanego z wykorzystaniem próbek obwiedni zebranych w okresie 0,5 s. Dodatkowo zastosowano miarę  $M_2$ , operującą tutaj na sygnale prądu obciążenia za taki sam okres. Wartości impedancji dla których miara  $M_2$  prądu obciążenia nie osiągnęła wybranego progu są odrzucane jako obarczone zbyt dużą niepewnością. Przeprowadzone badania modelowe pokazały, że zaproponowana metoda pozwala zidentyfikować model Thevenina z kilkuprocentową niepewnością. Niepewność ta może być zmniejszona przy zastosowaniu miary zmienności, kosztem zmniejszenia ilości wyników. W rozprawie przedstawiono w tym zakresie wyłącznie badania modelowe. Dla lepszego poznania właściwości metody konieczne jest przeprowadzenie ba-

dań eksperymentalnych, jednakże pozytywne wyniki badań modelowych pozwalają potwierdzić fragment tezy mówiący o możliwości wyznaczenia impedancji zastępczych.

## 5 Podsumowanie

W rozprawie zaproponowanych zostało sześć miar zaburzeń niskoczęstotliwościowych sygnałów sieci elektroenergetycznej, algorytm detekcji obwiedni zespolonej tych sygnałów, oraz metoda estymacji parametrów modelu Thevenina. Wyniki badań modelowych i eksperymentalnych zaproponowanych algorytmów potwierdzają postawioną na początku tezę rozprawy. W rozprawie zamieszczono są zarówno wyniki samodzielnej pracy autora, jak i w pewnym stopniu pracy zespołu do którego autor należy. Do dokonań autora zaliczyć należy:

1. Zaproponowanie nowych miar zmienności napięcia sieci elektroenergetycznej operujących na sygnale obwiedni zespolonej. Przebadanie zaproponowanych miar i podanie ich właściwości metrologicznych, w szczególności wrażliwości i efektywności obliczeniowej.
2. Przystosowanie opracowanego w zespole algorytmu detekcji obwiedni zespolonej opartego na transformacji Hilberta do działania w czasie rzeczywistym, przez zastosowanie nowego toru detekcji fazy chwilowej.
3. Zastosowanie okna hiperbolicznego w torze wyznaczenia częstotliwości systemu, zamiast średniej bieżącej.
4. Zaproponowanie parametrów algorytmu detekcji obwiedni zespolonej, pozwalających na analizę zarówno sygnału napięcia, jak i prądu. Zbadanie modelowe algorytmu o zaproponowanych parametrach, określenie jego właściwości metrologicznych i zestawienie ze spotykanymi w literaturze algorytmami demodulacji obwiedni napięcia.
5. Implementacja przedstawionego algorytmu w cyfrowym procesorze sygnałowym i systemie pomiarowym PXI, przeprowadzenie analiz sygnałów generowanych i rejestrowanych w sieci.
6. Wyznaczenie zaproponowanych miar zmienności obciążenia dla obwiedni sygnałów zarejestrowanych w sieci, wyznaczonych z użyciem przedstawionego algorytmu.
7. Zastosowanie zaprezentowanego algorytmu jako źródła obwiedni zespolonej przy identyfikacji modelu Thevenina systemu elektroenergetycznego, i wstępne przebadanie takiego zastosowania.

Opisane w pracy badania będą kontynuowane. W szczególności planowane jest zastosowanie i ewentualne modyfikacje zaproponowanych miar zmienności dla systemów trójfazowych, modyfikacje algorytmu detekcji obwiedni zespolonej pod kątem szybkości obliczeń oraz opracowanie nowych zastosowań algorytmu detekcji obwiedni zespolonej, np. w analizie zapadów napięcia lub propagacji zaburzeń.

## Literatura

- [1] Bień, A., Duda, K., Szyper, M., Wetula, A., Zieliński, T. P., Rozkrut, A.: *The new measure of low-frequency energy disturbances in power system*. Metrology and Measurement Systems, XI(2), 2005.
- [2] Bień, A., Szyper, M., Wetula, A.: *Badania modelowe sygnałów mierzonych miernikiem uciążliwości migotania światła*. W *Materiały XV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych*, 193–201. Krynica, 2005.

- [3] Rosołowski, E.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w automatyce elektroenergetycznej*. Oficyna wydawnicza EXIT, Warszawa, 2002.
- [4] Szafran, J., Wiszniewski, A.: *Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001.
- [5] Szyper, M.: *New time domain windows*. Electronics Letters, 31(9), 1995.
- [6] Szyper, M.: *Lipschitz's measures of measuring systems sensitivity to variability of parameters*. Systems Analysis Modelling Simulation, the Gordon and Breach Science Publishers, 30:45–55, 1998.
- [7] Wierzbicki, A.: *Modele i wrażliwość układów sterowania*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1. wyd., 1977.
- [8] *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 15: Flickermeter - Functional and design specifications*. Norma międzynarodowa IEC IEC 61000-4-15, 2003.
- [9] *Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4-30: Testing and Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods, Basic EMC Publication*. Norma międzynarodowa IEC IEC 61000-4-30, 2000.