

Analiza widmowa w diagnostyce energetycznych sieci rozdzielczych

W artykule przedstawiono metody estymacji widma przebiegów prądowych i napięciowych w energetycznych sieciach rozdzielczych. W stanie stacjonarnym zastosowanie okna prostokątnego dla analizowanego przebiegu w połączeniu z repróbko-owaniem w dziedzinie cyfrowej jest metodą optymalną, gdy w przebiegu występują wyłącznie składowe harmoniczne. Dla przebiegów ze składowymi interharmonicznymi metody analizy Fourierowskiej pozwalają otrzymać jedynie przybliżony skład widma, gdyż a priori nie jest znana częstotliwość składowych nieharmonicznych. W artykule obok analizy widma za pomocą transformaty Fouriera przedstawiono metodę opartą na rozkładzie na wektory własne macierzy autokorelacji sygnału oraz metodę minimalizacji sumy różnicy kwadratów między modelem sygnału a jego próbkami cyfrowymi

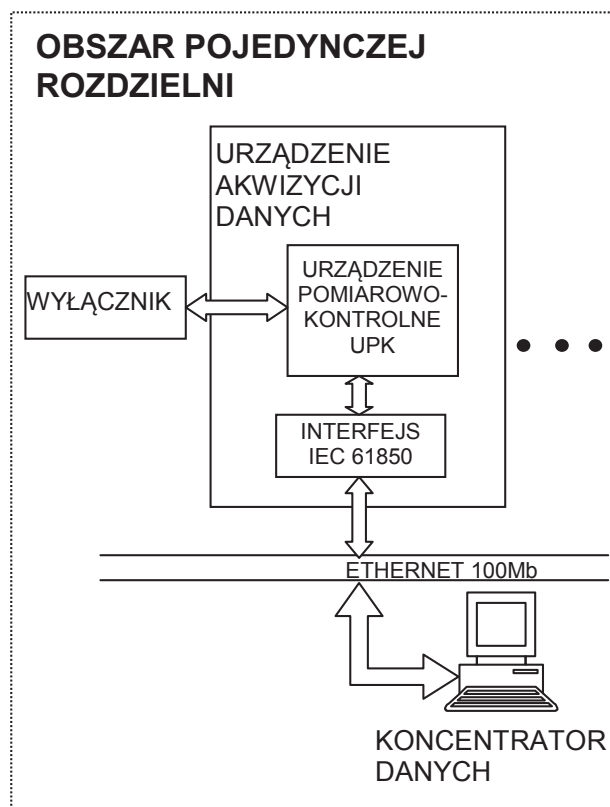
WSTĘP

Diagnostyka on-line podstawowych obiektów sieci energetycznych jakimi są wyłączniki odbywa się z wykorzystaniem transmisji danych dotyczących wyłącznika do dedykowanego komputera zawierającego oprogramowanie diagnostyczne (rys. 1) [1]. Z każdym wyłącznikiem jest stowarzyszone urządzenie akwizycji danych, które realizuje algorytmy zabezpieczeniowe oraz dokonuje na bieżąco akwizycji wszystkich sygnałów elektrycznych związanych z wyłącznikiem. Sygnały są zapisywane w buforze kołowym. W momencie wystąpienia zdarzenia otwarcia bądź zamknięcia wyłącznika zawartość bufora jest przesyłana do koncentratora danych – komputera klasy PC znajdującego się w rozdzielni. Długość bufora pozwala na zapis próbek sygnałów obejmujący okres 400 ms, rozpoczynający się na kilka okresów częstotliwości podstawowej przed zainicjowaniem zadziałania wyłącznika.

Oprogramowanie zainstalowane w koncentratorze danych składa się z modułu parametryzacji sygnałów oraz modułu systemu eksperckiego. System ekspercki na podstawie wyznaczonych parametrów sygnałów oraz bazy wiedzy wnioskuje o stanie wyłącznika.

W e-diagnostyce obiektów sieci energetycznych parametryzacja sygnałów związanych z obiektem odbywa się off-line w komputerze klasy PC. Oznacza

to, że do wyznaczania widma napięć oraz prądów fazowych, oprócz klasycznej analizy Fourierowskiej, możliwe jest wykorzystanie zaawansowanych metod



Rys. 1. System diagnostyczny wyłącznika

parametrycznych opartych o analizę macierzy autokorelacji przebiegu. Dobre rezultaty dają też metody estymacji parametrów modelu sygnału wykorzystujące optymalizację funkcji celu, jak np. minimalizację sumy kwadratów różnic między modelowanym przebiegiem a ciągiem próbek sygnału.

METODY NIEPARAMETRYCZNE WYZNACZANIA WIDMA

Klasyczna metoda wyznaczania widma polega na zastosowaniu dyskretnej transformaty Fouriera, DFT, do wybranego podzbioru z ciągu próbek sygnału. Widmo wyznaczone za pomocą DFT odpowiada rzeczywistemu widmu sygnału w przypadku spełnienia następujących warunków [2]:

- badany sygnał jest stacjonarny,
- częstotliwość próbkowania spełnia warunek Nyquista,
- liczba próbek odpowiada dokładnie wielokrotności okresu sygnału,
- sygnał nie zawiera składowych o częstotliwościach nie będących wielokrotnością częstotliwości podstawowej sygnału.

Sygnały napięć i prądów fazowych występujące w sieciach energetycznych szczególnie dobrze nadają się do analizy z wykorzystaniem DFT, gdyż są w długich okresach stacjonarne (okres niezmienności sygnału jest znacznie większy od okresu podstawowego), a znane i ograniczone od góry pasmo pozwala dobrać odpowiednią wartość częstotliwości próbkującej.

Dla spełnienia warunku całkowitej i równej 2^L liczbie próbek na okres, gdzie L jest liczbą całkowitą (w tej konkretnej aplikacji $2^L = 128$), w koncentratorze danych stosuje się operację repróbki. Polega ona na wstawieniu $N-1$ próbek zerowych między każdą z par próbek oryginalnych, poddaniu tak otrzymanego ciągu działaniu dolnoprzepustowego filtra interpolacyjnego, a następnie wybraniu co M -tej próbki. Otrzymuje się w ten sposób ciąg próbek o częstotliwości $(N/M)f$, gdzie f jest częstotliwością pierwotnego ciągu próbek. W zastosowanym w koncentratorze danych algorytmie repróbki współczynnik interpolacji N jest stały, natomiast współczynnik decymacji M zmienia się w zależności od wartości częstotliwości podstawowej sieci.

Dla przyjętej wartości częstotliwości próbkującej $f_s = 16$ kHz, pierwotna liczba próbek na okres zmienia się w zakresie $\langle 290,9; 355,6 \rangle$ w zależności od wartości częstotliwości podstawowej sieci energetycznej f_{line} . Po procesie repróbki, w którym $N = 80$, a M dobiera się zgodnie z zależnością

$$M = \left\lfloor \frac{f_s \cdot N}{f_{line} \cdot 128} \right\rfloor \quad (1)$$

gdzie $\lfloor x \rfloor$ oznacza liczbę całkowitą najbliższą x , otrzymuje się ciąg próbek o liczbie próbek na okres równej 128 ± 0.32 próbki. Błędy wyznaczania widma za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera, związane z niecałkowitą liczbą próbek na okres równą 0.32 próbki, nie przekraczają 2% dla harmonicznych do 10 rzędu i 10% dla harmonicznych do 40 rzędu.

W przypadku, gdy w widmie sygnału występują składowe o częstotliwościach anharmonicznych, tzn. nie będących wielokrotnościami częstotliwości podstawowej, do prawidłowego wyznaczenia widma za pomocą transformaty Fouriera konieczna jest znajomość częstotliwości, która jest największym wspólnym dzielnikiem dla wszystkich składowych występujących w sygnale. Taka częstotliwość, np. dla sygnału składającego się ze składowej podstawowej o częstotliwości 50 Hz i anharmonicznej o częstotliwości 17 Hz, jest równa 1 Hz. Ogólnie rozdzielczość częstotliwościowa transformaty Fouriera, odwrotnie proporcjonalna do długości analizowanego przedziału $n \cdot T$, pozwala wyznaczyć widmo z rozdzielczością $1/n \cdot T$. Ponieważ wartości częstotliwości składowych anharmonicznych nie są z reguły z góry znane, trudno jest wyznaczyć wartość n spełniającą kompromis między dokładnością wyznaczenia częstotliwości składowej anharmonicznej a nakładem obliczeniowym rosnącym znacznie z wartością n . Ponadto nie zawsze dysponuje się wystarczająco długim czasem obserwacji sygnału.

PARAMETRYCZNE METODY WYZNACZANIA WIDMA

Metody parametryczne wyznaczania widma sygnału energetycznego $v(t)$ zakładają jego sinusoidalny model z próbkami dyskretnymi wyrażonymi zależnością

$$v(n) = \sum_{k=1}^K a_k \cos(n\omega_{kn} + \phi_k) + \zeta(n) \quad (2)$$

gdzie $\zeta(n)$ jest składnikiem losowym, ω_{kn} jest częstotliwością unormowaną k -tej składowej ($\omega_{kn} = \omega_k/\omega_s$, $\omega_s = 2 \cdot \pi f_s$, f_s jest wartością częstotliwości próbkującej), przy czym ω_k nie jest koniecznością wielokrotnością częstotliwości podstawowej sieci energetycznej.

Parametryczne metody estymacji częstotliwości składowych widma oparte są na rozkładzie na wektory własne macierzy autokorelacji sygnału. Jedną z tych metod, o akronimie MUSIC (Multiple Signal Classification) [3], do wyznaczania częstotliwości składowych sygnału wykorzystuje pseudowidmo o postaci

$$P_{MUSIC}(e^{j\omega}) = \frac{1}{\sum_{i=K+1}^M |e^H \mathbf{s}_i|^2} \quad (3)$$

gdzie M jest rozmiarem macierzy autokorelacji sygnału $v(t)$, wektor

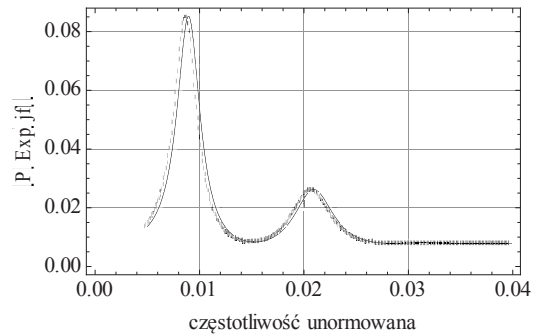
$$\mathbf{e} = [1 \quad e^{j\omega} \quad e^{j2\omega} \quad \Lambda \quad e^{j(M-1)\omega}]^T \quad (4)$$

jest ogólnie zapisanym wektorem własnym przestrzeni sygnałów, a H jest operatorem hermitowskim (poddanym transpozycji i wyznaczeniu wartości sprzężonej). P_{MUSIC} nazywane jest pseudowidmem, gdyż jego amplituda nie jest związana w żaden sposób z amplitudą rzeczywistego widma sygnału. Wielkości \mathbf{s}_i są wektorami własnymi związanymi z szumem nałożonym na sygnał. Ponieważ wektory własne

$$\mathbf{e} = [1 \quad e^{j\omega_{kn}} \quad e^{j2\omega_{kn}} \quad \Lambda \quad e^{j(M-1)\omega_{kn}}]^T \quad (5)$$

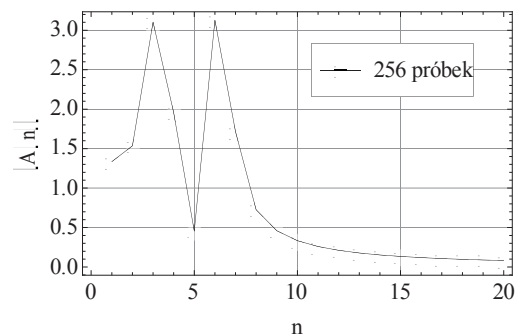
macierzy autokorelacji sygnału $v(t)$, związane ze składowymi sinusoidalnymi, są wzajemnie ortogonalne, dla częstotliwości $\omega = \omega_{kn}$, mianownik wyrażenia przyjmuje wartość minimalną. Należy wyznaczyć więc wartości częstotliwości, dla których P_{MUSIC} przyjmuje wartości ekstremalne. Zastosowanie algorytmu MUSIC należy poprzedzić odfiltrowaniem z badanego przebiegu składowej o częstotliwości podstawowej sieci, gdyż w przeciwnym wypadku składowa ta silnie dominuje macierz autokorelacji. Macierz autokorelacji $v(t)$ jest wyznaczana z realizacji czasowej sygnału $v(t)$ przy założeniu jego ergodyczności.

Metody oparte na rozkładzie na wektory własne macierzy autokorelacji sygnału charakteryzują się dużą złożonością obliczeniową, ale pozwalają wyznaczyć wartości częstotliwości składowych anharmonicznych dokładniej niż analiza Fouriera ze stosunkowo krótkiego okresu przebiegu sygnału. Dla przykładu przedstawiono zastosowanie algorytmu MUSIC do wyznaczenia częstotliwości składowych sygnału, który po odfiltrowaniu składowej o częstotliwości 50 Hz jest sumą sygnałów sinusoidalnych o częstotliwościach 63 Hz i 133 Hz o takich samych amplitudach. Wartości próbek pobrano z przebiegu o długości trwania równym 40 ms.



Rys. 2. Pseudowidmo P_{MUSIC} , wyznaczone dla macierzy autokorelacji sygnału, o składowych anharmonicznych o częstotliwościach 63 Hz i 133 Hz i jednakowych amplitudach

Widmo P_{MUSIC} posiada wyraźne wartości ekstremum występujące dla wartości częstotliwości 58 Hz i 134 Hz (rys. 2). Dla porównania widmo wyznaczone za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera tego samego sygnału z okresu czasu równego 40 ms (rys. 3) pozwala jedynie stwierdzić, że anharmoniczne znajdują się między 1 i 2 oraz 3 i 4 harmoniczną.



Rys. 3. Fragment widma Fourierowskiego wyznaczonego dla sygnału o składowych anharmonicznych o częstotliwościach 63 Hz i 133 Hz i jednakowych amplitudach za 1 okres

METODY WYZNACZANIA WIDMA METODĄ BEZPOŚREDNIEJ OPTIMALIZACJI

Metody bezpośredniej optymalizacji polegają na estymacji parametrów modelu sygnału tak, aby spełnione było kryterium optymalizacji (jak na przykład minimalizacja sumy kwadratów różnic między przebiegiem modelowym a próbkami sygnału). Metody optymalizacyjne sprawdzają się, gdy algorytmy szukania optimum, jako wartości początkowe, dostają wartości parametrów bliskie optymalnym. Jeśli rozpatrzmy sygnał o postaci (6)

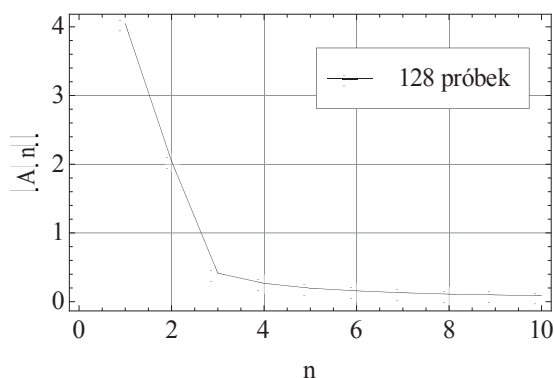
$$v(t) = A_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{anh1} \cdot t) + A_2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{anh2} \cdot t) \quad (6)$$

Tabela 1

Parametry modelu sygnału o postaci (6)

Parametr	A_1	A_2	f_{anh1} [Hz]	f_{anh2} [Hz]
Wartość startowa	0.5	0.5	75	125
Wyznaczona wartość	0.500736119497	0.495616919928	62.5742554954	132.176755023

to metody optymalizacyjne nie są sobie w stanie poradzić z wyznaczeniem f_{anh1} i f_{anh2} , jeśli nie określi się, że wartości startowe leżą np. odpowiednio w przedziałach $\langle 50, 100 \rangle$ i $\langle 100, 150 \rangle$ (a więc między pierwszą i drugą oraz drugą i trzecią harmoniczną). Dla wyznaczenia wartości anharmonicznych częstotliwości startowych procesu optymalizacji przydatna jest więc analiza Fourierska, nawet zgrubna przeprowadzona w przedziale czasu 40 ms. Ponownie można się tutaj posłużyć widmem, wyznaczonym za pomocą transformaty Fouriera za okres 40 ms, sygnału o postaci (6) z wartościami $f_{anh1} = 63$ Hz i $f_{anh2} = 133$ Hz (rys. 3). Widmo to wyraźnie wskazuje na istnienie składowych anharmonicznych między 1 i 2 oraz 2 i 3 harmoniczną. W tabeli 1 pokazano wartości startowe parametrów A_1 , A_2 , f_{anh1} i f_{anh2} oraz wartości wyznaczone przez minimalizację sumy kwadratów różnic między modelem sygnału (6) i jego próbkami za pomocą metody Newtona.



Rys. 4. Fragment widma Fourierskiego wyznaczonego z jednego okresu dla sygnału o składowej podstawowej 50 Hz i anharmonicznej o częstotliwości 17 Hz

Wskazówkę o pojawieniu się składowej anharmonicznej w widmie sygnału może udzielić również widmo wyznaczone tylko z jednego okresu podstawowego sygnału (rys. 4). Widać w nim niezerową składową o bardzo dużej wartości, odpowiadającą napięciu stałemu w sygnale. Sygnały występujące w sieci energetycznej z reguły nie posiadają składowej stałej, a poza tym jest ona zwykle odcinana przez stopnie wejściowe urządzeń rejestrujących. Składowa stała w widmie wyznaczonym z jednego okresu świadczy raczej o występowaniu składowej anhar-

monicznej o wartości częstotliwości mniejszej od częstotliwości podstawowej sieci. Ponownie można więc użyć metod optymalizacyjnych do wyznaczenia parametrów modelu sygnału, przyjmując 25 Hz jako wartość startową wartości częstotliwości składowej anharmonicznej.

WNIOSKI

Charakter sygnałów występujących w sieciach energetycznych, tzn. silna dominacja składowej podstawowej sprawia, że podstawowym narzędziem do wyznaczania widma jest dyskretne przekształcenie Fouriera z ciągu próbek odpowiadających jednemu okresowi. W przypadku, gdy istnieje podejrzenie pojawienia się w sygnale składowych anharmonicznych, tzn. sygnałów o częstotliwościach nie będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej, należy przeprowadzić analizę Fourierską w przedziale czasu większym niż okres podstawowy. Pojawienie się w widmie prążków o częstotliwościach interharmonicznych i dużej amplitudzie może świadczyć o występowaniu w sieci zjawisk ferorezonansowych. Do dokładnego wyznaczenia amplitudy i częstotliwości składowych anharmonicznych można następnie użyć metod parametrycznych, w których wyznacza się parametry modelu sygnału optymalizując pewną funkcję celu. Wartości startowe szukanych parametrów dostarcza Fourierska analiza widmowa.

Prace prezentowane w tym artykule są częścią projektu rozwojowego współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Funduszy Strukturalnych Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka, numer projektu WND-POIG.01.03.01-14-141/08.

Literatura

1. Ślusarek B., Lisowiec A., Chudorliński J.: Metoda oceny stanu wyłącznika na podstawie próbkowanych sygnałów elektrycznych. Mechanizacja i Automatyza Górnictwa 2009, nr 7.
2. Oppenheim A.V. & Schaffer R.W.: Discrete-Time Signal Processing, 1998 2ed., PH, USA.
3. Bollen M. H. J., Gu I. Y. H.: Signal Processing of Power Quality Disturbances. 2006 John Wiley & Sons.

SPECTROANALYSIS IN THE DIAGNOSTICS OF POWER DISTRIBUTION NETWORKS

The article describes the methods for spectrum estimation of current and voltage characteristics in power distribution networks. In the stationary state, the use of a square window for the analyzed characteristics, along with re-sampling in the digital domain, is an optimum method when there are only harmonic components in the characteristics. For the characteristics with inter-harmonic components, the Fourier analysis methods allow to obtain only an approximate composition of the spectrum since the frequency of non-harmonic components is not known *a priori*. Together with the spectrum analysis performed by the Fourier transform, the article presents a method based on the distribution into latent vectors of the signal autocorrelation matrix as well as a method of minimizing the sum of the difference of two squares between the signal model and its digital samples.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В ДИАГНОСТИКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

В статье представлены методы оценки спектра протеканий токов и напряжений в распределительных энергетических сетях. В стационарном состоянии использование прямоугольного окна для анализируемого протекания в соединении с повторным выбором в цифровой области является оптимальным методом, когда в протекании существуют исключительно гармонические составляющие. Для протеканий с интергармоническими составляющими методы анализа Фурье позволяют получить только приближённый состав спектра, так как частота негармонических составляющих неизвестна априори. В статье кроме анализа спектра при помощи преобразования Фурье представлено метод, основанный на разложении на собственные векторы матрицы автокорреляции сигнала и метод минимализации сумм разниц квадратов между моделью сигнала и его цифровыми образцами.