

BARTOSZ ROZEGNAŁ*

ZASTOSOWANIE TRANSFORMACJI FALKOWEJ DO WYKRYWANIA ZWARĆ W LINII DWUSTRONNIE ZASILANEJ CZ. II – ANALIZA FALKOWA SYGNAŁÓW

SHORT CIRCUITS DETECTION IN DOUBLE SOURCED ELECTRICAL LINES PART II – DISCRETE WAVELET TRANSFORM

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono analizę falkową DWT sygnałów zwarciovych otrzymanych na podstawie symulacji na dwuczwońnikowym modelu linii dwustronnie zasilanej. Omówiono ją pod kątem skuteczności wykrywania zwarć oraz wrażliwości na przypadkowe zakłócenia występujące w sieci. Ważnym elementem artykułu jest zwrócenie uwagi na to, jak duży wpływ na poprawność oraz szybkość wykrywania wystąpienia awarii, w tym przypadku zwarcia, ma odpowiednio założone jądro falkowe oraz stopień dekompozycji przetwarzanej informacji. Dobór parametrów do algorytmu detekcyjnego na podstawie bazy danych *zwarcia-przebiegi_dynamiczne* zawierającej próbki sygnału badanego ma pokazać możliwości praktycznego wykorzystania tego typu informacji w przypadku przebiegów zarejestrowanych w rzeczywistych sieciach elektroenergetycznych

Słowa kluczowe: dyskretna transformata falkowa, dyskretna transformata Fouriera, jądro falkowe, zwarcie

Abstract

This paper presents an analysis of short circuit signals by discrete wavelet transform. The signals are obtained by simulation on two four-pole UHV transmission line's model. Both efficacy of short circuit detection and sensibility to other system's faults are discussed. An important part of the article is to consider the great influence of well adjusted wavelet function and decomposition level on correctness and speed of short circuit detection. The adequate selection of detection algorithm's parameters based on database including the signal's samples shows a possibility of practical use of this kind of information in real transmission lines.

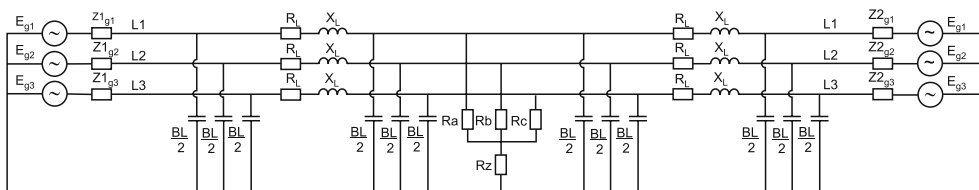
Keywords: DWT, DFT, wavelet function, short circuit

* Mgr inż. Bartosz Rozegnał Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Współcześnie, w dobie komputeryzacji, kiedy zabezpieczenia systemów elektroenergetycznych coraz częściej działają na podstawie technik komputerowych istnieje potrzeba dalszego rozwoju tego typu współpracy. Jedną z takich metod dających duże możliwości, a nie do końca wyczerpanych, jest algorytm oparty o dyskretną transformatę falkową. Pomimo olbrzymiego postępu, pojawianie się zwarcia w systemach elektroenergetycznych wciąż jest nieuniknione i pociąga za sobą wiele niebezpieczeństw, nie tylko tych mogących uszkodzić bardzo drogi osprzęt, ale również stanowiących zagrożenie dla zdrowia i życia ludzkiego. Szybkość detekcji zwarcia jest więc bardzo istotnym parametrem determinującym klasę aparatury zabezpieczeniowej. Obecny rynek sprawia, że przy projektowaniu różnego rodzaju urządzeń, w tym aparatury zabezpieczeniowej, niezbędne jest zwrócenie uwagi na aspekt ekonomiczny. Ceny mikroprocesorowych urządzeń w porównaniu z jakimkolwiek osprzętem elektroenergetycznym są pomijalnie małe. Zatem w tej materii należy szukać metod tanich, a przede wszystkim szybkich i niezawodnych.

W przedstawionym artykule zaprezentowano jedną z tego typu technik spełniających powyższe wymagania, nie tylko ze względu na sprawność działania, ale również na ewentualne koszty produkcji. Procedura ta pozwala wykrywać zwarcia właśnie na podstawie wcześniej wspomnianego algorytmu DWT. Działanie algorytmu docelowo opiera się na bezpośrednim porównywaniu badanego sygnału próbkowanego w czasie rzeczywistym z odpowiednio dopasowaną funkcją falkową. Głównym problemem, z jakim trzeba się zmierzyć jest dobór takiego przekształcenia falkowego i takich jego parametrów, które spowodują, że w wyniku porównania zostanie otrzymane duże podobieństwo porównywanych-badanych przebiegów w przypadku stanu awaryjnego – zwarcia, natomiast małe w przypadku próbek odpowiadających pracy bezawaryjnej. W artykule w szczegółowy sposób przedstawiono proces tworzenia oraz doboru parametrów tego typu algorytmu. Poprawność działania uzyskanego programu wykrywającego zwarcia jest uzależniona od dokładności modelu symulacyjnego, na podstawie którego otrzymano sygnały prądowe będące przedmiotem analizy. Program może zostać wykorzystany w celu detekcji stanów awaryjnych – zwarcia metalicznych pojawiających się w obrębie linii przesyłowych w rzeczywistych systemach elektroenergetycznych, jak również być przedmiotem dalszego rozwoju. Słuszność wykorzystania omawianego rozwiązania w praktyce jest podyktowana stopniem podobieństwa modelu systemu, na podstawie którego ono powstało, do rzeczywistego systemu, w którym miałyby działać.



Rys. 1. Schemat linii dwustronnie zasilanej zbudowanej z dwóch łańcuchowo połączonych czwórników

Fig. 1. Scheme of double-sourced electrical line (transmission line) consisted of 2 two-port networks

Algorytm przeznaczony do detekcji zwarc, jak i jego parametry opracowano na podstawie bazy danych – *zwarcia-przebiegi_dynamiczne* [1], przygotowanej w pierwszej części artykułu. Baza powstała w oparciu o symulacje różnych rodzajów zwarc metalicznych na modelu systemu elektroenergetycznego pokazanym na rys. 1.

Jak pokazano w pierwszej części artykułu schemat z rys. 1, w którym linia przesyłowa zbudowana jest z dwóch połączonych kaskadowo czwórników dyskretyzuje model linii długiej, a jako zaletę przedstawiono niewielką złożoność obliczeniową związaną z takim odwzorowaniem. Układ równań typu:

$$\frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \quad (1)$$

dla danego modelu, jak również strukturę powstałej w wyniku jego rozwiązania bazy danych *zwarcia-przebiegi_dynamiczne* również można znaleźć w części pracy poświęconej opracowaniu wzorca dla transformaty falkowej. W skład otrzymanego zbioru informacji wchodzi między innymi wartości napięć i prądów w przypadku symulacji wszystkich rodzajów zwarc metalicznych w 10 wybranych miejscach zwarcia w obrębie badanej linii. Zarejestrowane wartości składają się na przebieg, w którym można wyróżnić 2 fazy. Pierwsza trwająca do 0,15 sekundy symulacji to przypadek pracy bezawaryjnej modelowanej sieci elektroenergetycznej, natomiast kolejna zaczynająca się po 0,15 sekundy to stan awaryjny [1]. W ten sposób, przeprowadzając analizę zapisanych danych, można np. za pomocą sieci neuronowej lub dyskretnej transformaty falkowej wykryć moment zwarcia lub dobrać parametry do układu zabezpieczającego, który przerwie zwarcie, które wystąpiło w obrębie systemu elektroenergetycznego o podobnych parametrach do modelu symulacyjnego. Przykład takiego działania oparty na algorytmie DWT jest głównym tematem tego artykułu.

2. Analiza działania algorytmu DWT

Jedną z najszybszych metod wykrywania zwarc opartych na technikach komputerowych jest algorytm detekcyjny wykorzystujący ciągłą lub dyskretną transformatę falkową. Pomimo wielu zalet związanych z używaniem CWT zdecydowanie rzadziej wykorzystuje się ją w celu detekcji zwarc niż w przypadku DWT. Dzieje się tak z tego względu, iż algorytm CWT jest bardziej skomplikowany, a ponadto praca komputera czy programu komputerowego przeprowadzającego analizę sygnałów jest oparta na sygnale zdyskretyzowanym, czyli takim, na którym sprawdza się transformata przedstawiona za pomocą poniższego wzoru:

$$\text{DWT}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a^m}} \sum_n s(k) \Psi(a^{-m}n - bk) \quad (2)$$

gdzie:

- $S(k)$ – sygnał wejściowy dyskretny,
- Ψ – funkcja falkowa (falka matka),
- a – parametr skali,
- b – parametr przesunięcia.

CWT natomiast, jak sama nazwa mówi, jest przeznaczona do sygnałów ciągłych. Ponadto wzorec, na podstawie którego ma powstać algorytm detekcyjny nie uwzględnia zwarc

powstających poza obrębem badanej linii oraz nagłych zmian jej obciążenia, czyli sytuacji, w przypadku których dobre rezultaty dają użycie ciągłej transformaty falkowej. Dlatego po rozbudowie wzorca o przedstawione przypadki istotne będą również wyniki otrzymane za pomocą CWT [4].

Najważniejszą własnością, która przemawia za dyskretną transformatą falkową w odróżnieniu od znanej i często stosowanej dyskretnej transformaty Fouriera (DFT) jest fakt, że DWT przenosi dokładną, niezakłóconą informację czasową, a w przypadku zwarć jest to bardzo ważna zaleta. Algorytm ten działa na zasadzie porównania odcinków zdyskretyzowanego sygnału badanego przebiegu dla stanów przejściowych z jądrem falkowym. Im większe jest podobieństwo, tym większy otrzymujemy współczynnik wynikowy. Głównym problemem jest znalezienie takiego jądra falkowego, które będzie dawało niskie wartości podobieństwa w przypadku pracy bezawaryjnej, natomiast wysokie podczas zwarcia. Należy zatem przeanalizować budowę falki i sposób, w jaki za jej pomocą otrzymuje się współczynnik podobieństwa, o którym mowa.

Działanie falki i funkcji skalującej przypomina działanie filtru pasmowo-przepustowego, gdzie tzw. falka matka jest ściśle skorelowana z filtrem górnoprzepustowym, natomiast funkcja skalująca z filtrem dolnoprzepustowym. Odpowiednio pierwsza, tworząc spłot z sygnałem badanym, kreuje detale tego sygnału (tak zwane współczynniki podobieństwa, od których zależy ocena trafności zastosowania danego jądra falkowego), natomiast druga aproksymacje. Ze względu na istnienie ściślejszej zależności między filtrem dolno- i górnoprzepustowym, a mianowicie:

$$h_G(n) = (-1)^n h_D(N - n) \quad (3)$$

gdzie:

$h_D(-n)$ – filtr dolnoprzepustowy,
 $h_G(-n)$ – filtr górnoprzepustowy.

zaprojektowanie własnej rodziny falek, odpowiedniej do potrzeb danej analizy, sprowadza się głównie do wyznaczenia współczynników filtru $h_D(n)$, który musi spełniać następujące warunki:

I) liczba współczynników filtru musi być liczbą parzystą (4)

II) $\sum_n h(n) = \sqrt{2}$ (5)

III) $\sum_n h(n)h(n-2k) = \begin{cases} 1 & \text{dla } k=0 \\ 0 & \text{dla pozostałych wartości } k \end{cases}$ (6)

gdzie:

k – liczba stopni swobody danego filtru,

oraz w przypadku filtrów wyższych rzędów przy liczbie stopni swobody większej bądź równej 1 dobrania właściwych parametrów. Następnie za pomocą prostych operacji matematycznych przeprowadzonych na wektorze współczynników filtru $h_D(n)$ otrzymuje się funkcję falkową oraz funkcję skalującą [4]. O ile samo ułożenie i rozwiązanie powstałego układu równań nieliniowych nie jest skomplikowane, to odpowiedni dobór parametrów, które są odpowiedzialne za działanie danej falki nie jest już łatwy. Próba podjęcia takiego problemu została zaprezentowana w kolejnym rozdziale.

3. Wybór przekształcenia falkowego oraz stopnia dekompozycji opartego na nim sygnału

Najprostszym sposobem sprawdzenia tego, jaka falka i który stopień dekompozycji sygnału daje najlepsze efekty dla rozważanego zjawiska jest zestawienie funkcji DWT dla różnych jąder falkowych w środowisku Matlab.

W porównaniu uwzględniono cztery najbardziej znane funkcje falkowe dostępne w programie Matlab oraz jedną własną funkcję falkowa zaprojektowaną dla potrzeb tego przypadku. Proces tworzenia własnego przekształcenia oparty na pokazanym w rozdziale 2 algorytmie przebiegał według następujących punktów:

1. Dobór rzędu filtra dolnoprzepustowego skorelowanego z falką $N = 6$.
2. Określenie liczby stopni swobody $k = 2$.
3. Ułożenie równań na podstawie warunków opisanych zależnościami (4)–(6):

$$\begin{cases} h(1) + h(2) + h(3) + h(4) + h(5) + h(6) = \sqrt{2} \\ h(1)^2 + h(2)^2 + h(3)^2 + h(4)^2 + h(5)^2 + h(6)^2 = 1 \\ h(1) \times h(3) + h(2) \times h(4) + h(3) \times h(5) + h(4) \times h(6) = 0 \\ h(1) \times h(5) + h(2) \times h(6) = 0 \end{cases}$$

4. Rozwiązanie układu czterech równań z sześcioma niewiadomymi. W wyniku mniejszej liczby równań niż niewiadomych, każdy otrzymany współczynnik filtra $h(n)$ jest zależny od dwóch parametrów (c, d):

$$\begin{cases} h(1) = f_1(c, d) \\ h(2) = f_2(c, d) \\ h(3) = f_3(c, d) \\ h(4) = f_4(c, d) \\ h(5) = f_5(c, d) \\ h(6) = f_6(c, d) \end{cases}$$

5. Odpowiedni dobór parametrów zapewniający otrzymanie współczynników filtra, który działając na próbkach sygnału zwarciovego pobranych z bazy danych *zwarcia-przebiegi_dynamiczne* spowoduje otrzymanie małych wartości detali dla sygnału odpowiadającego pracy bezawaryjnej układu, natomiast bardzo dużych dla sygnału zwarciovego. Wybrane stałe:

$$c = \frac{\pi}{2}$$

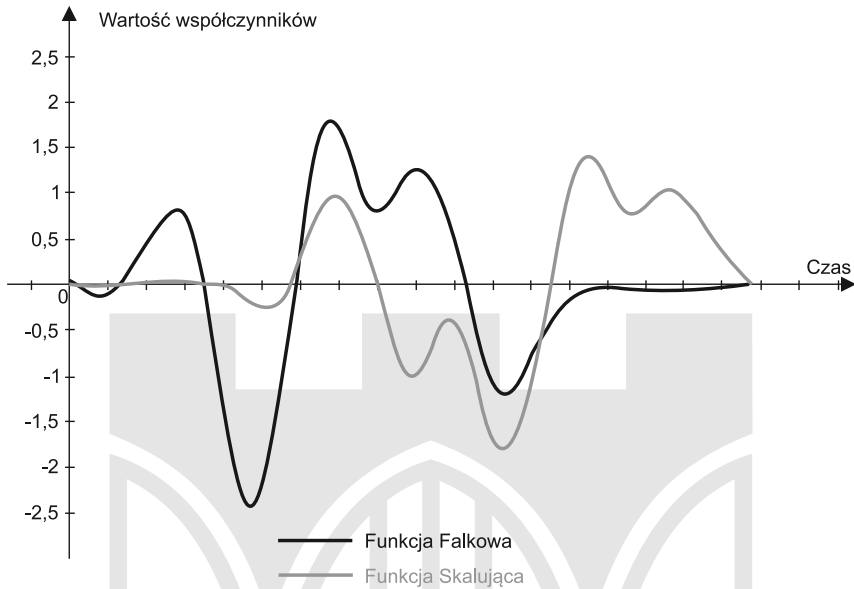
$$d = \pi$$

6. Na podstawie otrzymanych współczynników $h(n)$ oraz przedstawionego wcześniej wzoru (3) zbudowano filtry:

$$h_D(-n) \text{ – filtr dolnoprzepustowy}$$

$$h_G(-n) \text{ – filtr górnoprzepustowy}$$

7. Po prostych operacjach matematycznych na wektorze współczynników filtru $h(n)$, określono główną funkcję falkową, której kształt został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Wykres przedstawiający kształt zaprojektowanej falki oraz jej funkcji skalującej opartej o filtr szóstego rzędu z parametrami: $c = \frac{\pi}{2}$, $d = \pi$

Fig. 2. The graph shows shape of designed wavelet function and its scaling function based on sixth level filter with arguments: $c = \frac{\pi}{2}$, $d = \pi$

Porównanie jąder falkowych oraz stopni dekompozycji sygnału pod kątem skuteczności wykrywania zaburzeń sygnałów spowodowanych zwarciami (stosunku wartości detali w dwóch stanach pracy: stan pracy normalnej oraz stan zwarciový) przeprowadzono na podstawie wartości symulacyjnych dla zwarcia fazy $L1$ z ziemią na $\frac{1}{10}l$ długości linii pochodzących z bazy danych *zwarcia-przebiegi_dynamiczne*. Przebieg badanego sygnału został zamieszczony na rys. 3. Obserwując wykres prądu na wyjściu generatora, można dokładnie odczytać czas, w którym nastąpiło zwarcie. Chwila ta dzieli przebieg na dwie fazy. Pierwsza to stan pracy normalnej – do 0,15 s, natomiast druga to przebieg zwarciový – po 0,15 s. W algorytmie detekcyjnym do wykrycia zwarcia wystarczające są dane pochodzące z pierwszych chwil po pojawieniu się tego zjawiska (maksymalny wykorzystywany przedział czasowy $<0,15-0,18$) [s]), natomiast pozostała część symulacji jest przeznaczona do pokazania, jak proponowany algorytm DWT zachowuje się w dalszych chwilach zwarcia.

Dzięki takiej strukturze sygnału łatwo można ocenić skuteczność porównywanych falek. Pierwsze porównanie dotyczy wartości detali, jakie otrzymano po splocie sygnału prądowe-

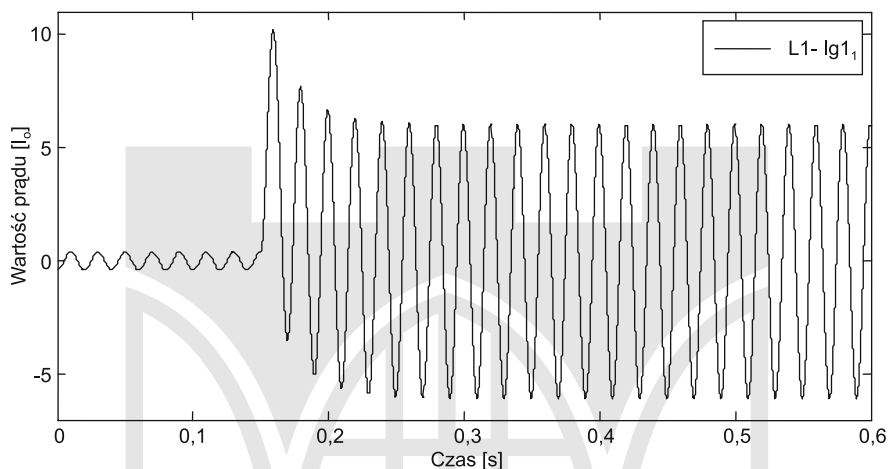
go z falką, a dokładnie z filtrem górnoprzepustowym skorelowanym z tą falką. Realizująca ten krok operacja w Matlabie wygląda w następująco:

$[A1,D1]=dwt('sygnał\ badany', 'nazwa\ funkcji\ falkowej')$

gdzie:

$A1$ – to wektor aproksymacji sygnału badanego po pierwszym stopniu dekompozycji,

$D1$ – to wektor detali sygnału badanego po pierwszym stopniu dekompozycji.



Rys. 3. Zdyskretyzowany sygnał prądu fazy $L1$ (zwarcie $L1 - Ziemia$ na $\frac{1}{10}l$ długości linii) pochodzący z bazy danych *zwarcia-przebiegi_dynamiczne*

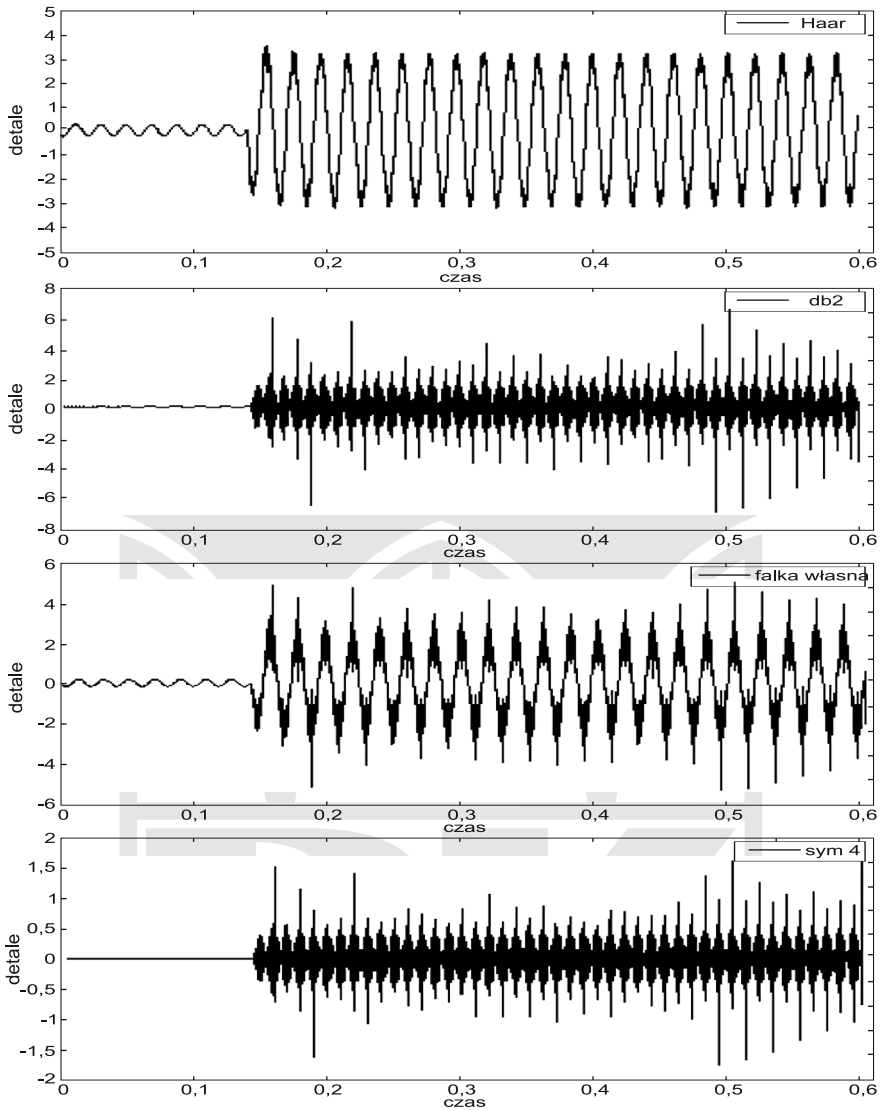
Fig. 3. The discrete current signal ($L1$ to grand short circuit on $\frac{1}{10}l$ of a line) taken from *zwarcia-przebiegi_dynamiczne* database

Każde z porównywanych przekształceń falkowych było skorelowane z filtrem innego rzędu w celu doboru optymalnego rozwiązania. W tabeli 1 zestawiono dane testowanych jąder falkowych [3].

Tabela 1

Dane testowanych jąder falkowych

Nazwa skrótu	Pełna nazwa rodziny falkowej	Rząd przekształcenia falkowego
haar	Falka Hara	2
db2	Falka Daubechies	4
falka_własna	Zaprojektowana falka	6
sym4	Symlets	8



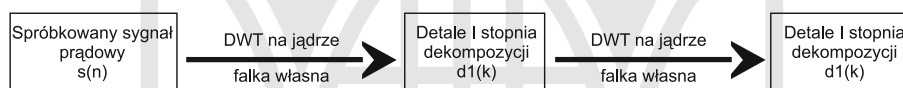
Rys. 4. Detale pierwszego stopnia dekompozycji sygnału zwarciego dla czterech różnych przekształceń falkowych

Fig. 4. The details of the first level decomposition of short circuit signal for four wavelet function

Taki wybór przekształceń był podyktowany różnorodnym kształtem ich funkcji falkowych, a co jest z tym związane różnym stopniem podobieństwa do badanych sygnałów zwarcowych. Pozwoli to na sprawdzenie szerokiego zakresu odpowiedzi algorytmu detekcyjnego. Sam rząd przekształcenia falkowego również wpływa na stopień podobieństwa do sygnału zwarcowego,

przy czym im wyższa jest jego wartość tym dłuższy jest czas realizacji algorytmu opartego na takiej falce. Efekty działania funkcji dwt dla powyższych jąder przedstawiono na rys. 4.

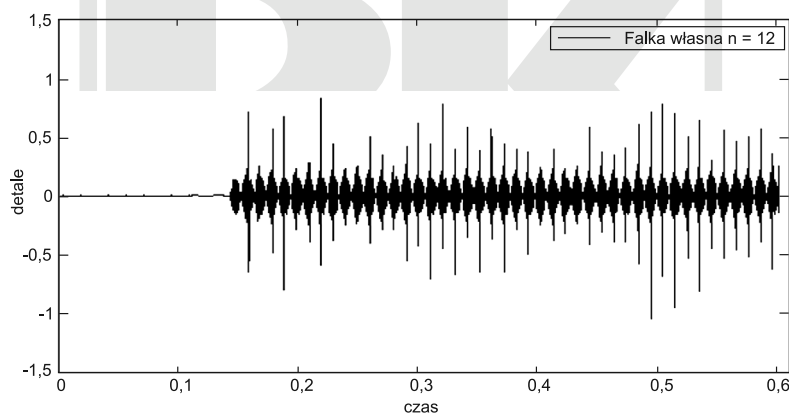
Wszystkie przekształcenia falkowe zastosowane w analizie DWT przenoszą bardzo dokładną informację o czasie wystąpienia zwarcia. Dla pierwszej 1,5 sekundy próbek sygnału pobranego z bazy danych, odpowiadającego pracy bezawaryjnej systemu elektroenergetycznego wartości detali we wszystkich przekształceniach falkowych, są małe lub praktycznie niezauważalne natomiast dla próbek sygnału występującego po 1,5 sekundy, odpowiadającego zwarcia jednofazowemu, wartości detali gwałtownie rosną. W przypadku falki Hara opartej na filtrze drugiego rzędu sygnał prądowy został przeniesiony w niewiele zmienionej formie. Dużo lepiej sprawdziła się falka własna, mimo iż wartości detali dla sygnału przedzwarciovego są znaczące, to jednak w stosunku do sygnału oryginalnego zostały w znacznym stopniu stłumione. Stosunek wartości współczynników otrzymanych z przekształcenia DWT dla czasu od 0–1,5 do tych, które pojawiły się dla sygnału po 1,5 s jest znacznie mniejszy niż w przypadku falki Hara, co jest bardzo istotną własnością przemawiającą na korzyść falki własnej. Najlepsze rezultaty otrzymano natomiast dla przekształceń $db2$ oraz $sym4$, gdzie sygnały prądowe do chwili 1,5 s zostały całkowicie stłumione, wycięte przez filtry skorelowane z tymi falkami. W celu poprawienia działania falki własnej, uzyskania dużo lepszych własności tłumiących dla sygnału niezakłóconego, zdublowano rząd filtra skorelowanego z tą falką przez jego podwójne zastosowanie na sygnale badanym. Procedurę tę przedstawia poniższy schemat [4]:



Rys. 5. Schemat podwójnej dekompozycji sygnału prądowego opartej na jądrze falki własnej

Fig. 5. The scheme of second level signal's decomposition based on wavelet function

Wynik operacji prezentuje rys. 6:



Rys. 6. Wartości detali sygnału prądowego otrzymane po DWT opartej o falkę własną, skorelowaną z filtrem 12 rzędu

Fig. 6. The details of DWT of current signal based on własna wavelet function correlated to 12 level filter

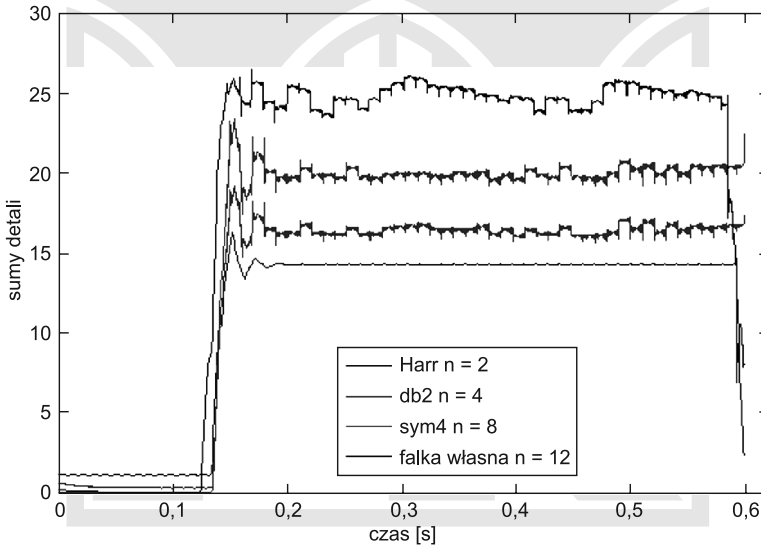
W efekcie przedstawionego powyżej działania otrzymano przekształcenie falkowe oparte na filtrze 12 rzędu. Co prawda taka procedura powoduje dwukrotne pomniejszenie liczby detali otrzymanych po transformacji, ale również znacząco ogranicza ich wartości dla przebiegu niezakłóconego.

Kolejnym etapem porównania przedstawionych jąder falkowych jest zsumowanie pewnej liczby następujących po sobie detali pierwszego stopnia dekompozycji. Operacja ta pokaże, jaki jest stosunek odpowiedzi danej funkcji falkowej na sygnał przed zwarciem do sygnału po zwarciu. Realizacja w programie Matlab:

```
[D1]= abs(D1);
for i=1:n
    fc(i)=sum(D1(i:pp+i));
end
```

gdzie:

- n – liczba próbek sygnału wyjściowego po pierwszym stopniu dekompozycji,
- pp – liczba sumowanych, następujących po sobie próbek.



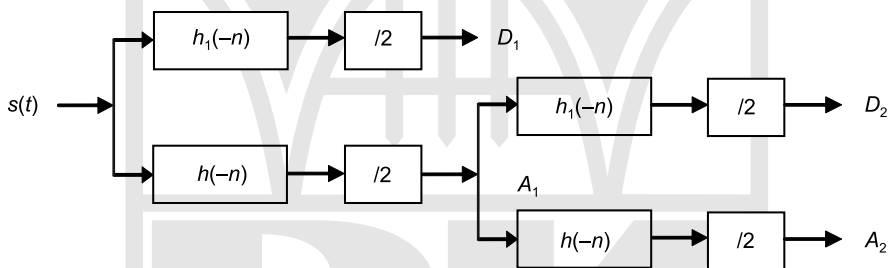
Rys. 7. Sumy detali badanych przekształceń falkowych dla $pp = 300$

Fig. 7. Sum of details of examined wavelet functions for $pp = 300$

Przebiegi przedstawiające sumy detali pierwszego stopnia dekompozycji sygnału prądowego dla porównywanych funkcji falkowych po wykonaniu powyższych operacji zostały zamieszczone na rys. 7. Liczba sumowanych próbek pp jest w tym przypadku istotna, ponieważ im większa jej wartość zostanie zastosowana, tym większa będzie różnica między sygnałem zwarciowym a sygnałem niezakłóconym oraz bardziej regularny przebieg sygnału wyjściowego. Wysoka wartość tego parametru może spowodować, że w przypadku próby zastosowania algorytmu do wykrywania zwarć poza obszarem badanej linii przebieg wyj-

ściowy mający w takiej sytuacji mniejsze wartości detali zostanie znacząco wygładzony. W konsekwencji algorytm nie wykryje takiego zwarcia. Dlatego po rozbudowie modelu symulacyjnego o zwarcia zewnętrzne może okazać się konieczne zmniejszenie wartości pp lub zastosowanie dwóch różnych wariantów tej wielkości. Stała pp wpływa również na rozmycie czasu wykrycia zwarcia ze względu na sumowanie znajdujących się obok siebie próbek jeszcze niezakłóconych i tych występujących już po zwarcu. Efekt taki można również zaobserwować na rys. 7. Analiza zamieszczonych na nim wykresów wykazała, że im wyższy jest ‘rzęd’ falki, tym bardziej stłumiony jest sygnał prądowy występujący przed 0,15 s symulacji. Najlepszymi przekształceniami falkowymi są zatem falka własna oraz $sym4$, przy czym z racji na podwójne zastosowanie tej pierwszej na sygnale badanym liczba próbek wyjściowych takiej transformacji jest dwukrotnie mniejsza przez co czas ramki zawierającej sumy detali wydłuża się dwukrotnie, co wpływa niekorzystnie na precyzyje (szybkość) wykrycia ewentualnego zwarcia. Na podstawie przedstawionej analizy do opracowania algorytmu DWT wykrywającego zwarcie zostało wybrane jądro falkowe $sym4$ opierające swoje działanie o filtr rzędu ósmego.

Kolejnym krokiem jest sprawdzenie wpływu stopnia dekompozycji sygnału na wybrane przekształcenie $sym4$. Schemat przemian sygnału i liczby jego próbek po kolejnych stopniach dekompozycji został zamieszczony poniżej [4]:



Rys. 8. Proces kolejnych stopni dekompozycji badanego sygnału

Fig. 8. Decomposition process of examined signal

Kod realizujący powyższy schemat w programie Matlab:

```
[A1,D1]=dwt('sygnał badany', 'sym4')
```

```
[A2,D2]=dwt(A1, 'sym4')
```

```
...
```

```
[A(N),D(N)]=dwt(A(N-1), 'sym4')
```

```
for i=1:n
```

```
    fc(i)=sum(D(N)(i:pp+i));
```

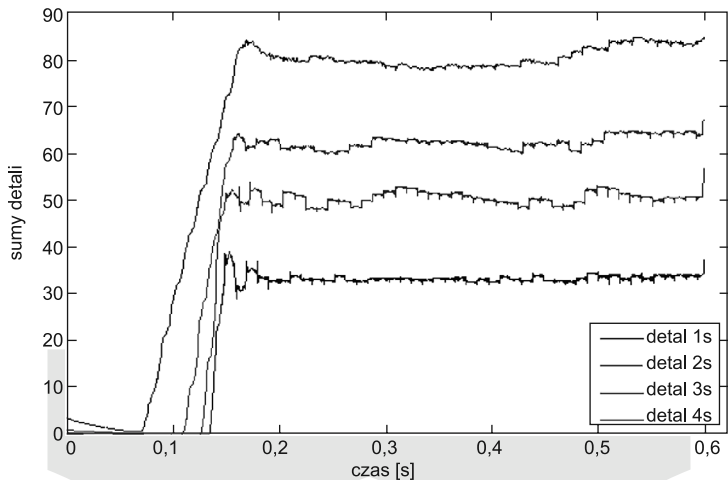
```
end
```

gdzie:

$A(N)$ – aproksymacje sygnału badanego po N stopniu dekompozycji,

$D(N)$ – detale sygnału badanego po N stopniu dekompozycji.

Przebiegi otrzymane dla czterech kolejnych stopni dekompozycji:



Rys. 9. Sumy detali czterech stopni dekompozycji sygnału badanego powstałego w oparciu o przekształcenie falkowe *sym4*

Fig. 9. Sum of details of four following levels of signal decomposition based on *sym4* wavelet function

Mimo dużych wartości odpowiedzi, jakie uzyskano przy wykorzystaniu detali wyższych rzędów, ich stosunek odpowiadających pracy zwarciowej do pracy w stanie bezawaryjnym jest mniejszy niż w przypadku detali pierwszego stopnia dekompozycji. Poza tym każda kolejna transformacja spowodowała dwukrotne zmniejszenie liczby próbek wyjściowych, przez co czas trwania 'ramki czasowej' zawierająca sumy detali ulegał dwukrotnemu wydłużeniu dla każdej kolejnej odpowiedzi DWT. Doprowadziło to do rozmycia zauważalnej granicy charakterystycznej dla chwili wystąpienia zwarcia, co można zaobserwować na rys. 9. Ze względu na to, że szybkie wykrycie zwarcia i oszacowanie jego czasu wystąpienia jest bardzo istotne w omawianym algorytmie detekcyjnym, do jego budowy został wybrany sygnał pochodzący z pierwszego stopnia dekompozycji DWT działającej w oparciu o jądro falkowe *sym4*.

4. Algorytm detekcyjny oparty na analizie DWT

Algorytm detekcyjny działa na zasadzie dyskretnej transformaty falkowej przeprowadzonej na spróbkowanym sygnale prądowym (w tym przypadku pochodzącym z symulacji stanu awaryjnego przeprowadzonej na modelu pokazanym w pierwszej części artykułu), opartej o jądro falkowe *sym4*. Jest ono ważnym parametrem dobranym na podstawie informacji zgromadzonych w bazie danych *zwarcia-przebiegi_dynamiczne*. Zasada działania algorytmu została przedstawiona w następujących krokach:

1. Próbkowanie sygnału prądowego pochodzącego z urządzenia pomiarowego, działającego w czasie rzeczywistym →

$$s(t) \rightarrow s(n) \rightarrow$$

2. Pierwszo-poziomowa dekompozycja spróbkowanego sygnału \rightarrow

$$\rightarrow s(n) \rightarrow DTF(sym4) \rightarrow d1(k) \rightarrow$$

3. Sumowanie liczby pp następujących po sobie wartości detali \rightarrow

$$\rightarrow d1(k) \rightarrow sum(pp) = \sum_{n-pp}^n abs(d1(n)) \rightarrow$$

4. Porównanie otrzymanej sumy z parametrem z – warunek na wartość awaryjną \rightarrow

$$\rightarrow sum(pp) > z \rightarrow$$

5. Sumowanie kolejnych próbek spełniających powyższy warunek (w przypadku niespełnienia warunku wyzerowanie parametru k) \rightarrow

$$\rightarrow \text{if } sum(pp) > z \text{ } k = k + 1 \text{ else } k = 0 \rightarrow$$

6. Sprawdzenie kolejnego warunku – warunek zwarciowy \rightarrow

$$\rightarrow k \geq zwr \rightarrow$$

7. Wysłanie informacji o wystąpieniu zwarcia do aparatury zabezpieczającej w przypadku spełnienia powyższego warunku. W innym wypadku, przejście do punktu 3 \rightarrow

$$\rightarrow \text{informacja - zwarcie} \rightarrow$$

8. Zdziałanie aparatury zabezpieczającej – przerwanie zwarcia \rightarrow

$$\rightarrow \text{wylączenie zasilania} \rightarrow$$

gdzie:

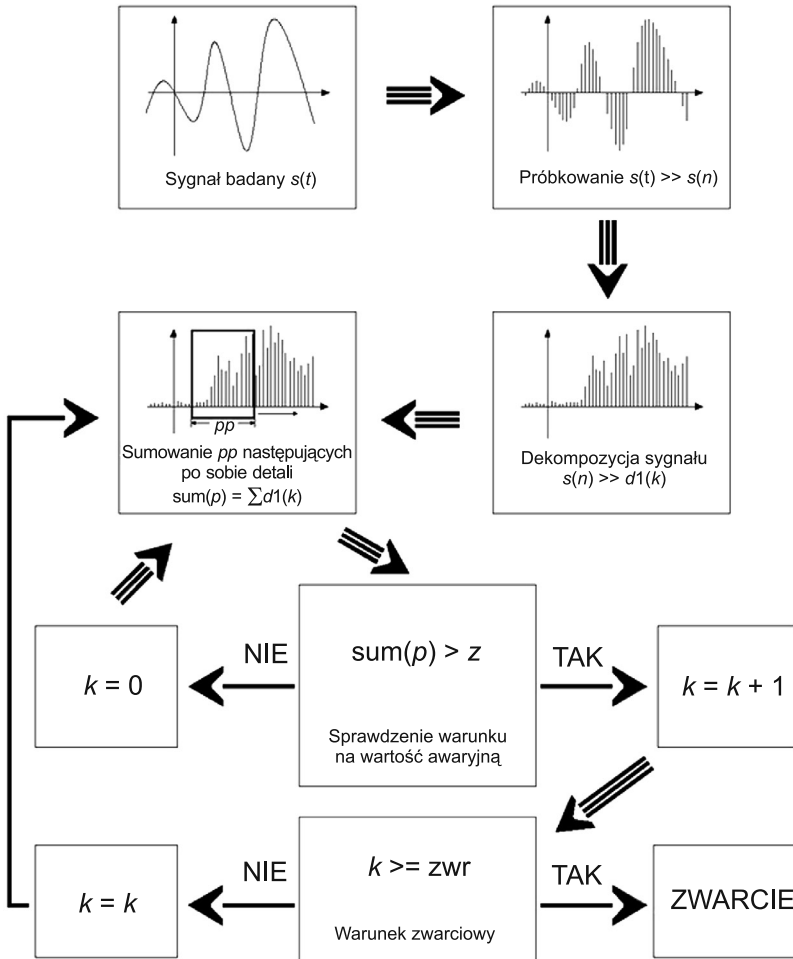
- z – parametr odpowiadający wartości sumy detali charakterystycznej dla stanu awaryjnego,
- zwr – parametr odpowiadający liczbie kolejnych próbek uznawanych za sygnał zwarciowy, po osiągnięciu którego algorytm wysyła informację o wystąpieniu zwarcia [5].

Schematycznie proces działania algorytmu detekcyjnego zobrazowano na rys. 10.

Próbkowany w czasie rzeczywistym sygnał prądowy jest poddawany za pomocą mikroprocesora dyskretnej transformacie falkowej działającej w oparciu o jądro przekształcenia $sym4$. Po dokonaniu pierwszo-poziomowej dekompozycji algorytm sumuje odpowiednią liczbę pp następujących po sobie wartości otrzymanych detali, przy czym ustalono, że najlepsze rezultaty otrzymuje się dla wartości $pp = 300$ (suma kolejnych detali oznaczona jako $sum(pp)$). Wartość ta jest kolejnym parametrem algorytmu określonym za pomocą sygnałów zapisanych w bazie danych powstałej na podstawie modelu linii dwustronnie zasilanej. Istotną informacją jest to, iż sygnały zapisane w wykorzystywanej bazie danych odpowiadają częstotliwości próbkowania równej 60 kHz, a ma ona duży wpływ na parametr pp , ponieważ pośrednio określa gęstość otrzymywanych detali na jednostkę czasu. W przypadku braku urządzenia pomiarowego działających z tak wysoką częstotliwością, na podstawie wyników którego w czasie rzeczywistym miałyby działać omawiana operacja detekcyjna, parametr pp powinien zostać obniżony proporcjonalnie do częstotliwości próbkowania zastosowanego

urządzenia. Należy pamiętać, że im większa wartość pp zostanie zastosowana, tym większa będzie poprawność wykrycia wystąpienia zwarcia, natomiast spadnie szybkość jego detekcji oraz precyzja określenia chwili jego wystąpienia. Dla przykładu przy częstotliwości próbkowania 60 kHz rozmycie czasowe spowodowane ‘ramką czasową’ składającą się z 300 próbek wyniesie maksymalnie 0,01 s, co dalej jest dobrym wynikiem potwierdzającym słuszność wybranego parametru. Zastosowanie urządzenia pomiarowego próbkującego z częstotliwością 6 kHz wymagało by obniżenia parametru pp do wartości 30 dla zachowania przedstawionego wyżej rozmycia czasowego. Następnym etapem jest porównywanie uzyskanych sum detali z kolejnym parametrem algorytmu – zz :

$$sum(pp) > zz \quad (7)$$



Rys. 10. Schemat pracy algorytmu detekcyjnego DWT

Fig. 10. The scheme shows phases of DWT algorithm's process

Parametr ten określa wartość, od której suma kolejnych 300 następujących po sobie detali zostanie zakwalifikowana jako próbka odpowiadająca zwarcia. Na podstawie przeprowadzenia analizy (której efektem były wykresy sum detali dla prądów różnych faz i przy różnych typach zwarcia) wszystkich sygnałów zawartych w bazie danych, stwierdzono, że dla systemu elektroenergetycznego mającego parametry zbliżone do modelu symulacyjnego wartość zmiennej zz gwarantująca niezawodne działanie powinna wynosić 5. Jest to parametr ponad 100-krotnie przekraczający wartości odpowiadające pracy bezawaryjnej. Zatem jeśli zostanie spełniony warunek (7) zmienna iteracyjna kryjąca się np. pod symbolem k , mająca wartość początkową 0, zostanie powiększona o 1. W celu eliminacji wykrycia jako zwarcia chwilowych przebiegów lub zakłóceń, a są one bardzo widoczne w przypadku transformaty falkowej zamieniającej układ naturalny czas–wartość na układ typu czas–częstotliwość, należy założyć, że odpowiednio duża liczba następujących po sobie sum detali musi być większa od zz , czyli spełniać kolejny warunek:

$$k > zwr \quad (8)$$

przy czym, jeżeli którakolwiek z następujących po sobie sum nie spełni nierówności (7) zmienna k jest natychmiast zerowana i proces naliczania zaczyna się od początku. Liczba zwr jest więc kolejnym parametrem algorytmu detekcyjnego. Przyjęcie dużej wartości zwr powoduje, że procedura jest nieczuła na pojedyncze zakłócenia (zapobiega przed detekcją chwilowego przebiegu jako zwarcia), natomiast wydłuża czas wykrycia zwarcia. Każda kolejna suma $sum(pp)$, która musi spełniać warunek określony zależnością (7) powoduje wydłużenie czasu wykrycia zwarcia dla przyjętego próbkowania o kolejne $3,33 \times 10^{-5}$ s, dlatego należy rozsądnie dobrać omawianą stałą. Wprowadzenie zakłóceń do modelu symulacyjnego przedstawionego na pierwszych stronach artykułu pozwoliło wzbogacić bazę danych *zwarcia-przebiegi_dynamiczne* o kolejne próbki. Na ich podstawie oraz na podstawie pozostałych danych określono wartość parametru zwr na poziomie 300. Etapem końcowym pracy algorytmu po wystąpieniu liczby zwr kolejnych sum spełniających warunek (7) jest wysłanie informacji o wystąpieniu zwarcia do aparatury zabezpieczającej, która w odpowiedni sposób zareaguje na awarię i spowoduje przerwanie niepożądanego zjawiska. Wykorzystując powyższy schemat w oparciu o dobrane parametry:

Tabela 2

Parametry algorytmu detekcyjnego

przekształcenia falkowe	<i>sym4</i>
poziom dekompozycji sygnału	<i>I</i>
<i>pp</i>	300
<i>zz</i>	5
<i>zwr</i>	300

uzyskano algorytm detekcyjny nieczuły na zakłócenia niezwiązane ze zvarciami, wykrywający zwarcia z opóźnieniem czasowym na poziomie nie przekraczającym 0,02 s. Do przedstawionej wartości czasu należy jeszcze doliczyć czas zadziałania aparatury zabezpieczającej, natomiast czasy wykonania algorytmu oraz przesłania informacji o wystąpieniu zwarcia przy dzisiejszej technice komputerowej można uznać za nieistotne.

Realizacja algorytmu w programie Matlab:

```
[A1,D1] = dwt(Ig1_1,'sym4');
[detal]=abs(D1);
g=size(detal);
h=g(1,1);
n=h-pp;
for i=1:n
    fc(i,1)=sum(detall(i:pp+i));
    czas_wykrycia_zwarcia(i,1)=(0.6/h)*i;
    if fc(i,1)>=zz
        fl=fl+1;
        if fl>=zwr
            disp('zwarcie')
            disp(['czas wystąpienia zwarcia = ', num2str(czas_wykrycia_zwarcia(i,1)), ' [s]'])
            break
        end
    else fl=0;
    end
end
if i>=n
    disp('brak awarii')
end
gdzie:
```

Ig1_1 – to spróbkowany sygnał prądowy przedstawiony na rys. 3.

Otrzymany po uruchomieniu przedstawionego programu wynik:

```
zwarcie
czas wystąpienia zwarcia = 0,15703 [s]
```

świadczy o tym, że zwarcie z zastosowaniem parametrów algorytmu dobranych na podstawie omawianej bazy danych zostało zidentyfikowane poprawnie. Natomiast czas, po którym program wysłał sygnał o zaistnieniu awarii jest stosunkowo krótki i wynosi około 0,007 s. Zaprezentowany efekt działania programu pozwala zatem stwierdzić, iż parametry algorytmu zostały dobrane bezbłędnie, a sam algorytm detekcyjny przynosi zadowalające wyniki. W celu pokazania wpływu zmiany częstotliwości próbkowania na otrzymany czas detekcji zwarcia przetestowano algorytm na sygnale wzorcowym próbkowanym z częstotliwością 6 kHz (poziom częstotliwości pracy szerzej dostępnych urządzeń pomiarowych). Sumy detali uzyskane na takim sygnale przeskalowano do poziomu wartości odpowiadających wzorcowi pierwotnemu. Wartość sumy detali *pp* zmniejszono proporcjonalnie do zmiany częstotliwości – *pp* = 30. Natomiast wartość *zwr* ze względu na dziesięciokrotnie mniejszą liczbę próbek wyjściowych obniżono do wartości – *zwr* = 60 (wartość *zwr* = 30 jest również wystarczająca). Otrzymano następujący wynik:

```
zwarcie
czas wystąpienia zwarcia = 0,1632 [s]
```


Czas, po którym tym razem zostało wykryte zwarcie wynosi 0,013 s. Jest to również dobry rezultat, a różnica pomiędzy oboma symulacjami wynika z tego, iż wartość parametru *zwr* (dla symulacji 6 kHz) w stosunku do liczby próbek wyjściowych jest dwukrotnie większa, niż miało to miejsce w przypadku próbkowania na poziomie 60 kHz.

5. Podsumowanie

Przedstawiona w artykule procedura wykrywania zwarć opartych na analizie DWT dowodzi, że warto rozważyć stosowanie alternatywnych metod zabezpieczeń opierających swoje działanie na technikach komputerowych. Nierzadko dobrze opracowany algorytm detekcyjny daje lepsze rezultaty niż konwencjonalne zabezpieczenia i powoduje obniżenie ich kosztów, a obecnie jest to jedno z najważniejszych kryteriów. Poza tym jest źródłem informacji o chwili wystąpienia i czasie trwania zwarcia. Program detekcyjny może również współdziałać z typowymi zabezpieczeniami jako element wspomagający. Możliwość zaprojektowania przekształcenia falkowego dla potrzeb indywidualnego przypadku, jak również rozwinięcia algorytmu o funkcję lokalizacji miejsca zwarcia na podstawie przyporządkowania otrzymanych wartości detali odpowiadającym im odległością, w których wystąpiło zwarcie jest dodatkowym atutem tej metody. Wykorzystanie własności falek oraz technik mikroprocesorowych pozwala zatem na zbudowanie zabezpieczeń zoptymalizowanych pod kątem dowolnie wybranego fragmentu systemu elektroenergetycznego. Mnogość parametrów, jaka w wyniku takiego zestawienia jest dostępna, umożliwia nawet skrócenie czasu detekcji zwarcia przez powiększenie częstotliwości próbkowania lub zmianę odpowiednich stałych, gdy zaistnieje taka potrzeba.

Ze względu na fakt, iż przedstawiony w artykule algorytm został opracowany na wzorcu symulacyjnym pozwalającym jedynie na symulacje zwarć metalicznych w obrębie modelowanego systemu – linii przesyłowej, nie został on wyczulony na detekcję innych rodzajów zwarć, również często występujących w systemach elektroenergetycznych. Dlatego rozbudowa wzorca o inne typy zwarć wewnętrznych oraz zewnętrznych jest konieczna do uzyskania uniwersalnego oraz precyzyjnego algorytmu detekcyjnego i będzie podstawą dalszych badań.

Tworzenie modeli symulacyjnych rzeczywistych systemów elektroenergetycznych owocuje zbudowaniem szerokiej bazy danych zawierającej różnego rodzaju informacje o sygnałach prądowych oraz napięciowych pojawiających się w nietypowych stanach pracy. Otrzymane zbiory danych można następnie wykorzystać w celach badawczych, jak również praktycznie zastosować, choćby w taki sposób, jaki został zaprezentowany w artykule. Z powodu wielu zalet tego typu przedsięwzięć obecnie trudno jest sobie wyobrazić, aby jakakolwiek rozbudowa czy modernizacja systemu elektroenergetycznego nie została poprzedzona odpowiednimi symulacjami.

Literatura

- [1] R o z e g n a ł B., *Zastosowanie transformacji falkowej do wykrywania zwarć w linii dwustronnej zasilanej. Cz. I – Określenie bazy danych wzorców transformacji falkowej*, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo PK, Kraków 2012.

- [2] K a c e j k o P., M a c h o w s k i J., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [3] M r o z e k B., M r o z e k Z., *MATLAB i Simulink, Poradnik Użytkownika*, Wydanie III, Helion, 2010.
- [4] B i a ł a s i e w i c z J.T., *Falki i aproksymacje*, Wyd. 2., Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- [5] C h u l - H w a n K i m, H y u n K i m, *A Novel Fault-Detection Technique of High-Impedance Arcing Faults in Transmission Lines Using the Wavelet Transform*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, October 2002, 921-929.
- [6] S a ł a t R., O s o w s k i S., *Accurate fault location in the power transmission line using Support Vector Machine approach*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 2; 2004, 979-986 2006.
- [7] M u s i e r o w i c z K., *Niekonwencjonalne metody detekcji zwarć w systemach elektroenergetycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 06/2004.
- [8] H a l i n k a A., N i e d o p y t a l s k i M., *Metody wykrywania zwarć wieloprądowych w liniach elektroenergetycznych z wykorzystaniem transformaty falkowej*, Prace Naukowe Politechniki Śląskiej Seria Elektryka, zeszyt 1 (201), Gliwice 2007, 106-118.
- [9] Y o s h i h i d e H a s e, *Handbook of Power System Engineering*, WILEY 2007.
- [10] R u c k a M., W i l d e K., *Application of wavelet analysis in damage detection and localization*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007.
- [11] T a r i o v A., T a r i o v a G., M a j o r k o w s k a - M e c h D., *Algorytmy wielopoziomowej dekompozycji oraz rekonstrukcji sygnałów cyfrowych*, Polska Akademia Nauk, Oddział w Gdańsku, Gdańsk 2012.
- [12] N i e d o p y t a l s k i M., *Koncepcja zabezpieczenia odległościowego linii 110 kV wykorzystującego transformatę falkową*, Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Invention – Innowacyjność w Elektroenergetyce”, „Energetyka”, Zeszyt tematyczny nr XII, Ustroń, 25–26 października 2007, 44-48.

