

## Wykorzystanie przekształceń falkowych w przetwarzaniu sygnałów pomiarowych dla celów automatyki elektroenergetycznej

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono wyniki analiz dotyczących wykorzystania przekształceń falkowych do przetwarzania sygnałów prądowych dla celów rozróżniania stanów pracy napowietrznych linii WN o zintensyfikowanych zdolnościach przesyłowych. W liniach takich dopuszczalne obciążenia prądowe są znacznie większe niż w tradycyjnych rozwiązaniach. Jednak powoduje to znaczne zbliżenie się fazy impedancji dla tych stanów i stanów zwarciovych, co może skutkować dla dużych obciążeń, nieselektywnym wyłączeniem linii przez zabezpieczenie odległościowe.

**Abstract.** The paper presents the results of a research on the application of wavelet transforms for distinguishing the operating states of overhead HV transmission lines with increased capacity. In such lines, the allowable loads are considerably higher than in traditional solutions. However, the increased permissible load causes the impedance phasors for these states and short-circuit states are closer together. This can cause the line to be tripped by distance protection for high loads. (**The use of wavelet transforms in the signals processing for power protection purposes**).

**Słowa kluczowe:** przekształcanie sygnałów pomiarowych, transformata falkowa, napowietrzne linie WN, zdolność przesyłowych.

**Keywords:** processing of measurement signals, wavelet transform, HV overhead line, increasing capacity.

### Wstęp

W napowietrznych liniach WN o zintensyfikowanych zdolnościach przesyłowych dopuszczalne obciążenia prądowe są znacznie większe niż w tradycyjnych rozwiązaniach. Cecha ta jest wykorzystywana eksploatacyjnie umożliwiając zwiększenie transferu energii elektrycznej w ciągu liniowym, bez inwestycji sieciowych w nowe linie. Prądy dopuszczalne mogą być nawet dwukrotnie większe niż w tradycyjnych przypadkach. Konsekwencją takich warunków pracy linii jest zbliżenie się – a nawet nachodzenie - obrazów impedancyjnych (fazy impedancji) dla tych stanów i stanów zwarciovych. Klasyczne rozwiązania wykorzystywane przez układy decyzyjne zabezpieczeń odległościowych nie są w stanie odróżnić tych przypadków - mimo oczekiwanej różnej postaci decyzji.

Ponadto, rozpoznawanie stanu pracy obiektu – linii dla celów zabezpieczeniowych powinno odbywać się w krótkim reżimie czasowym, co klasycznie uzyskuje się zazwyczaj poprzez wykorzystanie krótkoczasowej transformaty Fouriera STFT [1]. Jednak ze względu na dynamikę i możliwą zmienność czasową sygnałów prądowych dla rozpoznawania stanu pracy linii o zwiększonych zdolnościach przesyłowych właściwości STFT, w tym stała długość okna pomiarowego, mogą powodować trudności z w prawidłowym i odpowiednio szybkim rozpoznaniu stanu pracy linii. Do takich zastosowań jedną z częściej proponowanych metod przekształcania sygnałów jest inna z transformat całkowych – transformata falkowa CWT (ciągła) lub MODWT (maksymalnie nachodząca dyskretna, inaczej ciągle-dyskretna) [2], [3], [4]. Jej główną zaletą jest zależność szerokości okna pomiarowego od częstotliwości (skali). Kolejną istotną pozytywną cechą transformaty falkowej jest znaczna liczba funkcji mogących stanowić jądro transformaty. Wykorzystane funkcje falkowe także powinny charakteryzować się odpowiednimi do zastosowań

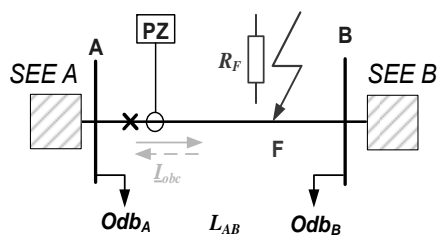
cechami, w tym przypadku, dotyczącymi przede wszystkim zwanego nośnika (krótka odpowiedź impulsowa), możliwie dużej symetryczności (mniejsze zniekształcenia fazowe) oraz ~~możliwie~~ dużej rozdzielczości zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości [5].

Stąd poprawna identyfikacja stanu pracy linii ma kluczowe znaczenia dla prawidłowego jej działania i skutecznej ochrony w warunkach zintensyfikowanych zdolności przesyłowych.

### Model symulacyjny

Analiz dotyczących możliwości rozpoznania stanu pracy linii dokonano z wykorzystaniem modelu symulacyjnego przykładowego układu sieciowego (rys. 1), w którym zmieniano warunki pracy linii. Symulowane stany pracy obejmowały zarówno zakłócenia zwarciovie - wymagające wyłączenia linii, jak i zmiany obciążenia linii w zakresie dopuszczalnym (lecz znacznie szerszym niż w klasycznych rozwiązaniach) - wymagające pozostawienie linii w pracy. Dla warunków zwarciovych modyfikacjom poddawano: miejsce zwarcia, chwilę wystąpienia zwarcia i rodzaj zwarcia, rezystancję przejścia w miejscu zwarcia. Z kolei dla stanów dopuszczalnych zmianie podlegały: charakter, wartość obciążenia linii i kierunek przepływu energii. Dla obu typów stanów pracy rozpatrywano zmiany obejmujące: warunki przedzakłóceniovie, długość linii, parametry źródeł zastępczych oraz częstotliwość próbkowania sygnałów pomiarowych. W badaniach przyjęto czas trwania symulacji równy 500 ms, a zakłócenie występowało w około 320 ms symulacji.

W efekcie przeprowadzonych w programie Netomac symulacji uzyskano bazę kilkunastu tysięcy sygnałów pomiarowych prądów trzech faz dla punktu PZ (rys. 1), obejmującą szeroką grupę zmienności stanów pracy dopuszczalnych i zabronionych linii.



Rys.1. Schemat układu symulacyjnego do wyznaczania sygnałów pomiarowych dla celów rozpoznawania stanu pracy linii

### Transformata falkowa

Bazę sygnałów wykorzystano dla badań związanych z określeniem możliwości i zaproponowaniem rozwiązania umożliwiającego rozróżnienie stanów pracy normalnej od stanów zakłóceń dla linii o zintensyfikowanych zdolnościach przesyłowych. Wymagane jest by rozwiązanie takie działało z czasem krótszym niż standardowe algorytmy pomiarowe i decyzyjne klasycznych zabezpieczeń – dla umożliwienia wspomaganie ich działania w sytuacjach znacznych obciążeń prądowych. W tym celu wykorzystano przekształcenia falkowe dostępne w oprogramowaniu Matlab - Wavelet Toolbox [6]. Właściwości wybranych funkcji falkowych, stanowiących jądro transformaty i dostępnych w wykorzystanym oprogramowaniu Matlab zestawiono w tabeli 1.

Zgodnie z wymienionymi wymaganiami stawianymi przekształceniu falkowemu i funkcji falkowej, wstępnie wybrano do badań jedynie te z rodzin falek, które umożliwiają ich spełnienie a charakteryzują się: krótkim nośnikiem (zapewnienie krótkiej odpowiedzi impulsowej), możliwie dużą symetrią (wprowadzanie mniejszych zniekształceń fazowych) oraz możliwie dużą rozdzielczością zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości. Następnie, na podstawie analiz transformaty falkowej sygnałów prądowych dla stanów zakłóceń i dopuszczalnej zmienności obciążenia z zastosowaniem tych rodzin funkcji falkowych dokonano wyboru funkcji falkowej posiadającej najkorzystniejsze cechy dla omawianych zastosowań Transformaty prądu fazy L3 dla chwili wystąpienia zwarcia trójfazowego równej 320 ms na 90 km linii o rezystancji przejścia 20  $\Omega$  z zastosowaniem tych funkcji falkowych przedstawiono na rysunku 2.

Tabela 1. Wybrane właściwości funkcji falkowych dla CWT i MODWT [6]

Cecha	Nazwa rodziny funkcji falkowej		
	Biorogonal	Daubechies	Symlet
Ortogonalność	nie	tak	tak
Biorogonalność	tak	tak	tak
Symetryczność	tak	nie	bliska symetryczności

Falka biorogonalna rzędu 1-5 (rys. 2b) nie zapewnia odpowiedniej rozdzielczości dla różnych skal, uniemożliwiając określenie chwili wystąpienia zakłócenia. Falka Daubechies rzędu 6 (rys. 2d) umożliwia wykrycie zakłócenia, jednak dla skal wyższych od 25 transformata cechuje się stosunkowo długim czasem trwania odpowiedzi impulsowej, połączonym ze znacznymi amplitudami wstęg bocznych widma amplitudowego. Bardzo dobre właściwości rozdzielczości częstotliwościowej oraz obserwowane zmienności współczynników transformaty dla stanów przed- i zwarciovych w stosunku do współczynników w chwili wystąpienia zwarcia zapewnia wykorzystanie funkcji falkowej biorogonalnej rzędu 2-8 (rys. 2c). Jednak korzystne właściwości okupione są znacznymi czasami odpowiedzi

impulsowej, co powoduje dopuszczalne, lecz niepotrzebne, zwiększone opóźnienie wykrycia stanu zwarcia. W porównaniu do wyników uzyskanych przy zastosowaniu falki symlet rzędu 3 (rys. 2a), czas trwania odpowiedzi impulsowej dla transformaty o podobnym zakresie częstotliwościowym, wykorzystującej falkę biorogonalną rzędu 2-8, trwa dwa razy dłużej. Stąd do dalszych analiz wybrano falkę symlet 3-go rzędu, cechującą się stosunkowo krótką odpowiedzią impulsową, dobrą rozdzielczością w dziedzinie częstotliwości, o niewielkich wartościach amplitud wstęg bocznych widma amplitudowego i korzystnych właściwościach dla przekształcania sygnałów prądowych dla analizowanych zjawisk [5], [7].

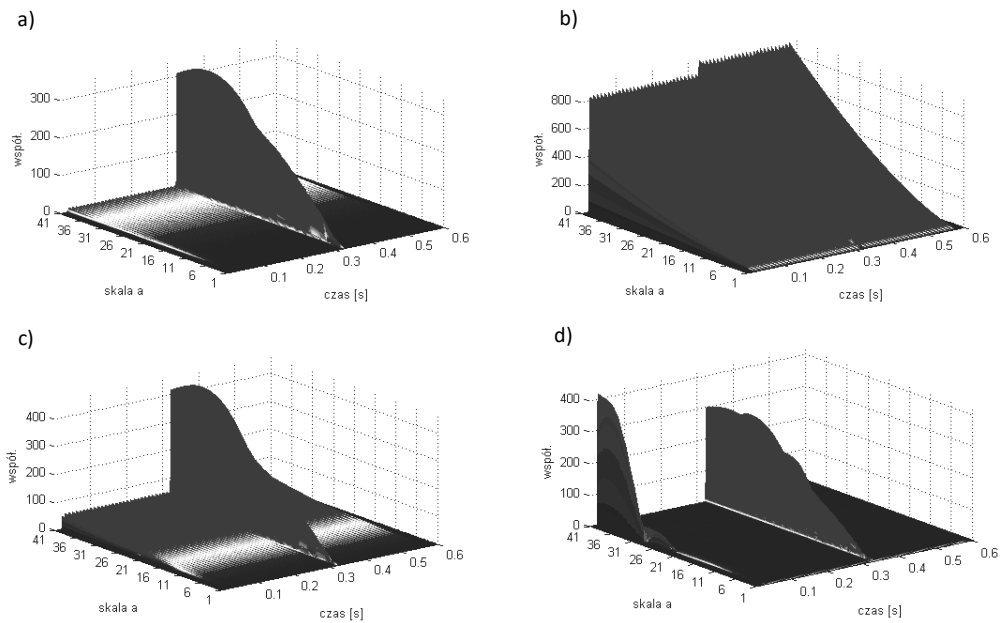
### Algorytm identyfikacji stanu pracy linii

Zastosowanie funkcji symlet rzędu 3 umożliwiło opracowanie algorytmów detekcji stanu pracy linii o wystarczająco krótkim czasie uzyskiwania decyzji, znacznie krótszym od czasu wyznaczania składowych impedancji. Analizy pokazały, że nie zawsze ten sam zestaw skali transformaty jest reprezentatywny dla wykrycia i rozpoznania wystąpienia stanu zwarcia, a po dodatkowych analizach ustalono dwa zestawy przekształceń umożliwiających utworzenie dwóch algorytmów identyfikacji stanu pracy linii. Wariant pierwszy algorytmu obejmuje próbkowanie sygnałów prądowych z częstotliwością równą 25 kHz oraz transformatę falkową wyznaczoną dla współczynników skali z zakresu 1 ÷ 35. Wariant drugi algorytmu obejmuje próbkowanie sygnałów prądowych z częstotliwością 50 kHz oraz transformatę falkową wyznaczoną dla współczynników skali z zakresu 5 ÷ 35. Dalsze analizy przeprowadzono dla różnych wybranych spośród całej bazy symulacyjnej - z wykorzystaniem m.in. krosvalidacji - sytuacji ruchowych, obejmujące zarówno zmiany obciążenia w zakresie dopuszczalnym jak i wystąpienie zwarć. Efektem przeprowadzonych analiz było m.in. wyznaczenie sumy wartości współczynników transformaty falkowej, co pozwoliło na określenie wartości progowych współczynników transformaty, finalnie umożliwiających rozróżnienie wystąpienia stanu zwarcia od zmian obciążenia linii w dopuszczalnym zakresie. Dla detekcji zwarć międzyfazowych wartość progowa wynosi 200, natomiast dla detekcji zwarć doziemnych – wynosi 150. Przykładowe analizowane przebiegi dla stanów dopuszczalnych i zwarciovych wraz z działaniem jednego z opracowanych algorytmów identyfikacji stanu pracy linii przedstawiono na rysunku 3.

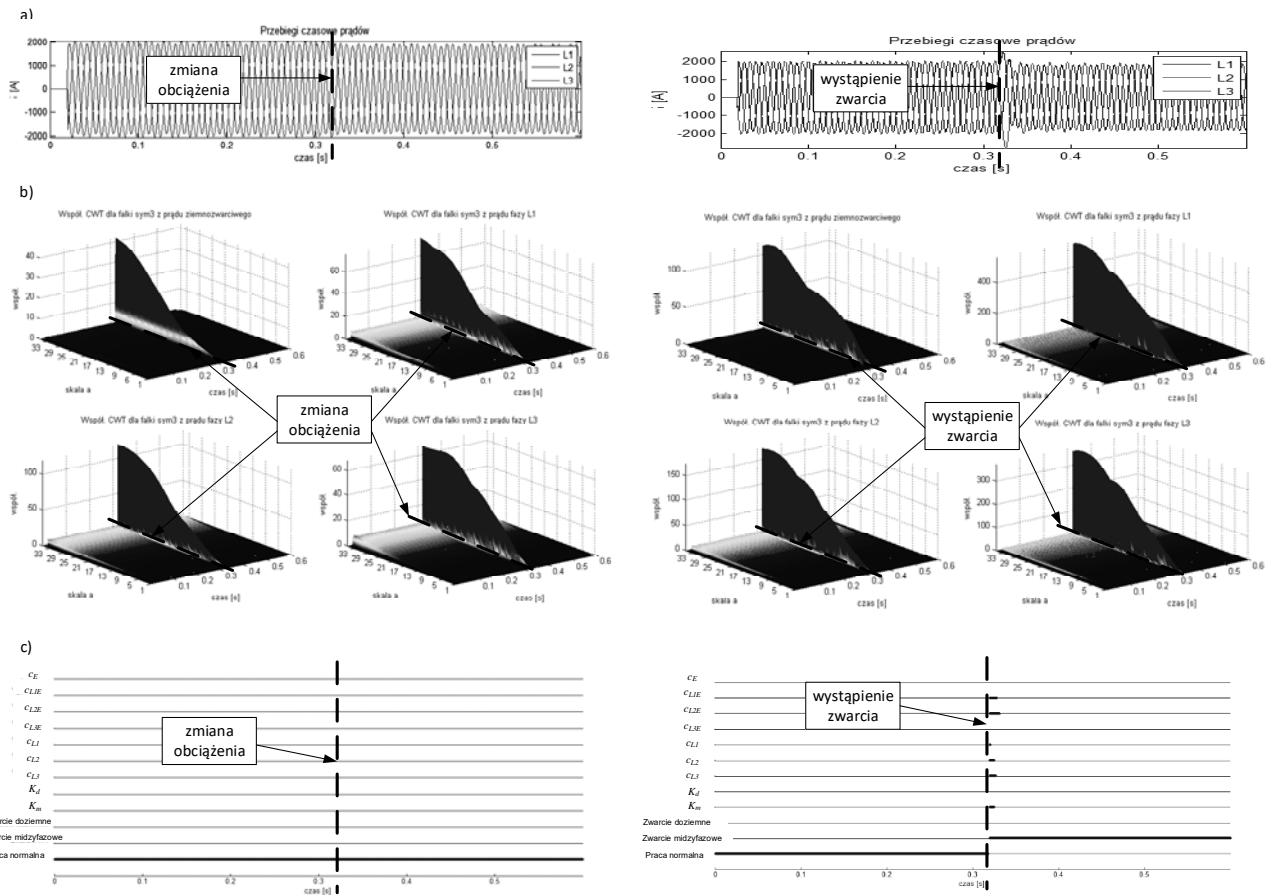
Zbiorcze zestawienia wyników poprawności identyfikacji stanu pracy linii zestawiono w tabelach. Obejmują one zarówno zmiany obciążenia w zakresie dopuszczalnym (łącznie z wykorzystaniem zakresu obciążalności dynamicznej) - tabela 2, jak i wystąpienie różnych typów zwarć dla linii o długości 100 km – w tabelach 3 i 4. W analizach skuteczności traktowano, że wystarczające do zaklasyfikowania jako prawidłowe wykrycie zwarcia jest wykrycie zwarcia przynajmniej w jednej z faz, w których faktycznie zwarcie wystąpiło, np. w dwóch fazach dla zwarcia trójfazowego.

Wśród uzyskanych wyników zdarzały się pojedyncze przypadki wykrycia zwarcia jednofazowego jako dwufazowego z ziemią. W wariantie 1 algorytmu najmniejszą wykrywalnością charakteryzują się zwarcia trójfazowe.

Spośród przeanalizowanych rozwiązań algorytmów identyfikacji stanu pracy linii przedstawiono wyniki dla najbardziej skutecznych a spośród nich, proponuje się wariant 1, który cechuje się zarówno dobrą skutecznością wykrywania zwarć, jak i rozpoznawaniem sytuacji zmiany warunków pracy sieci bez występującego zwarcia.



Rys.2. Przykładowe transformaty falkowe prądu fazy L3 dla wybranych funkcji falkowych: a) symlet rzędu 3, b) biortogonalna rzędu 1-5, c) biortogonalna rzędu 2-8, d) Daubechies rzędu 6



Rys.3. Działanie algorytmu identyfikacji stanu pracy linii w zakresie pracy normalnej i wysokim obciążeniu - obciążalność dynamiczna dla zmiany obciążenia (po lewej) i dla zwarcia 3F na 90 km o rezystancji 0,5  $\Omega$  (po prawej):

a) przebiegi czasowe wartości chwilowych prądów fazowych, b) wyznaczone transformaty falkowe dla prądów fazowych i ziemnozwarciowego, c) przebiegi dwustanowe warunków cząstkowych i decyzji końcowych;

$C_E, C_{L1E}, C_{L2E}, C_{L3E}$  – warunki cząstkowe dla wykrywania zwarc doziemnych;

$CL_1, CL_2, CL_3$  – warunki cząstkowe dla wykrywania zwarc międzyfazowych;

$K_d, K_m$  – warunki dla określenia stanu zwarcia doziemnego lub międzyfazowego;

Zwarcie doziemne, Zwarcie m-f, Praca normalna - decyzje końcowe o stanie zwarcia lub normalnym.

Tabela 2. Zestawienie skuteczności rozpoznania zmiany obciążenia (w dopuszczalnym zakresie) przez opracowane algorytmy dla dwóch długości linii

	Wariant	Długość linii [km]	
		50	100
Liczba przypadków	1	246	246
	2	246	246
Liczba przypadków rozpoznanych jako obciążenie	1	246	246
	2	246	236
Liczba przypadków rozpoznanych jako zwarcie	1	0	0
	2	0	10
Poprawność identyfikacji [%]	1	100	100
	2	100	96

Rozwiązanie, które cechowałoby się jeszcze większą zdolnością wykrywania zwarć stanowiłoby połączenie obu zaprezentowanych wariantów a decyzja stanowiłaby sumę działania obu algorytmów, jednak dla takiego rozwiązania zwiększyłoby się również ryzyko nieprawidłowej reakcji w sytuacjach braku zwarcia.

Tabela 3. Zestawienie procentowe skuteczności wykrywania różnych typów zwarć przez opracowane algorytmy

Rodzaj zwarcia	Wariant	Miejsce zwarcia [km]										
		1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
1F	1	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
2F		140	136	120	120	120	119	118	118	116	126	125
3F		140	140	140	140	140	140	138	122	103	82	89
2F+E		140	140	140	140	140	140	140	133	116	112	104
1F	2	133	131	134	121	128	134	140	140	140	140	140
2F		136	120	118	101	97	100	116	126	140	140	140
3F		140	140	140	133	110	101	122	131	135	136	133
2F+E		140	140	140	137	134	121	135	138	138	138	138
Suma	1	560	556	540	540	540	539	536	513	475	460	458
	2	549	531	532	492	469	456	513	535	553	554	551
Skuteczność	1	100	99	96	96	96	96	96	92	85	82	82
	2	98	95	95	88	84	81	92	96	99	99	98

Tabela 4. Zestawienie procentowe skuteczności wykrywania zwarć o zmiennej rezystancji przejścia  $R_F$  przez opracowane algorytmy

$R_F$ [ $\Omega$ ]	Wariant	Miejsce zwarcia [km]										
		1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99
0,5	1	112	112	108	108	108	108	108	110	112	108	112
2		112	112	108	108	108	108	108	110	112	107	112
10		112	112	108	108	108	108	108	110	110	104	109
50		112	112	108	108	108	108	108	103	93	89	82
100		112	108	108	108	108	107	104	80	48	52	43
0,5	2	112	108	108	103	102	104	106	109	112	112	112
2		112	108	108	102	101	104	106	109	112	112	112
10		112	107	108	100	101	99	106	109	112	112	112
50		109	104	106	95	90	83	105	106	112	112	112
100		104	104	102	92	75	66	90	102	105	106	103
Suma	1	560	556	540	540	540	539	536	513	475	460	458
	2	549	531	532	492	469	456	513	535	553	554	551
Skuteczność	1	100	99	96	96	96	96	96	92	85	82	82
	2	98	95	95	88	84	81	92	96	99	99	98

Dla wariantu pierwszego algorytmu, w miarę zwiększania rezystancji przejścia i miejsca zwarcia zmniejsza się skuteczność wykrywania zwarć pośrednich. Natomiast dla algorytmu drugiego spadek skuteczności

wykrywania zwarć o dużych rezystancjach przejścia zauważalny jest dla zwarć występujących w połowie długości linii.

### Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz zidentyfikowano możliwość a następnie opracowano algorytmy umożliwiające szybkie rozróżnienie stanu pracy linii o zintensyfikowanych zdolnościach przesyłowych. Z wypracowanych przez algorytmy decyzji uzyskuje się informacje o wystąpieniu stanu zwarcia doziemnego, międzyfazowego lub pracy normalnej (obciążen dopuszczalnych w warunkach zintensyfikowanych zdolności przesyłowych). Wśród nich wystąpiły sytuacje zarówno zbędnych, jak i brakujących działań. Działania brakujące dla pierwszego wariantu algorytmu obejmowały przede wszystkim przypadki zwarć trójfazowych w końcowym odcinku linii (o długości 100 km). Prawidłowość podejmowanych decyzji na podstawie przeanalizowanych ponad kilku tysięcy symulacji wynosi dla obu rozwiązań ponad 92%. Stwierdzono, że opracowane algorytmy są mało wrażliwe na wpływ rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, natomiast są stosunkowo wrażliwe na wartość chwilową napięcia w momencie wystąpienia zakłócenia (najmniejsza skuteczność wykrywania zwarć dotyczy przypadków ich wystąpienia dla napięcia chwilowego bliskiego jego amplitudzie, co jest spowodowane niewielkimi wartościami składowych przejściowych w prądach). W pewnych przypadkach (jednofazowe zwarcia w pobliżu połowy długości linii) może to ograniczyć skuteczność detekcji zwarć przez opracowane algorytmy.

Czas własny opracowanych algorytmów wynosi maksymalnie 8 ms i wynika z długości funkcji falkowej dla największej z analizowanych skal transformaty, powiększony o warunek potwierdzenia decyzji.

Planowane dalsze prace będą obejmowały analizy opracowania algorytmów o szerszym od przedstawionego zakresie skutecznego działania, w tym zdolności do wykrywania zwarć o większej rezystancji przejścia i mniejszej wrażliwości na wartość chwilową napięcia w chwili powstawania zakłócenia.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Adrian Halinka, Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Adrian.Halinka@polsl.pl; dr inż. Marcin Niedopytalski, Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Marcin.Niedopytalski@polsl.pl

### LITERATURA

- [1] Winkler W., Wiszniewski A.: Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych, WN T, Warszawa 2004
- [2] Adly A.R., Aleem S.H.E.A., Algabalawy M.A., Jurado F., Ali Z.M. A novel protection scheme for multi-terminal transmission lines based on wavelet transform, *Electric Power Systems Research*, 183 (2020), 106286
- [3] Osipov D., Kovalev V., Arkhipova O., Dolgikh -N.: Application of wavelet transform for identification of single phase-to-ground fault in compensated networks, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), nr 6, 34-38,
- [4] Halinka A., Niedopytalski M.: Evaluation of the correctness of operation of adaptive under-impedance criterion for HV single and double-circuit overhead power line with increased capacity, *Przegląd Elektrotechniczny*, 78 (2017), nr 4, 76-79 doi: 10.15199/48.2017.04.19
- [5] Niedopytalski M., Zabezpieczenie odległościowe linii wysokiego napięcia o adaptacji parametrycznej do zmiennych dopuszczalnych zdolności przesyłowych, Rozprawa doktorska, Gliwice, (2013)
- [6] Wavelet Toolbox User's Guide, The MathWorks, Inc. 2022
- [7] Halinka A., Niedopytalski M., Szewczyk M.: Od Fouriera do Mallata - postęp w dziedzinie analizy sygnałów. *Elektro-Info*, (2006), nr 11, 70-75,