

# Analiza porównawcza metod wyznaczania współczynnika szybkości zmian częstotliwości jako kluczowego wskaźnika oceny stabilności systemu elektroenergetycznego

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono wybrane wyniki analizy porównawczej dwóch metod wyznaczania współczynnika szybkości zmian częstotliwości. Współczynnik ten będzie kluczowym parametrem oceny stabilności systemu elektroenergetycznego w przyszłości. Obecnie z uwzględnieniem tego współczynnika definiuje się wymagania dla urządzeń i operatorów tego rodzaju systemów. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych wykazały jednak znaczące rozbieżności wartości tego współczynnika w zależności od zastosowanego algorytmu jego wyznaczania.

**Abstract.** This article presents a key comparative analysis results of methods applied for determining the rate of change of frequency, which becomes the key factor for assessing the stability of the power system. This factor will be a key parameter for assessing the stability of future power systems. Currently, requirements for device manufacturers and system operators are defined taking this factor into account. However, the obtained results of simulation tests show significant differences in the value of this factor depending on the estimation algorithm used. (**Comparative analysis of methods for determining the rate of change of frequency as a key factor for assessing stability of the power system**).

**Słowa kluczowe:** algorytmy pomiarowe, estymacja częstotliwości, szybkość zmian częstotliwości, stabilność systemu elektroenergetycznego.

**Keywords:** measurement algorithms, frequency estimation, rate-of-change-of-frequency, power system stability.

## Wprowadzenie

Podstawowym celem Europejskiego Zielonego Ładu jest dążenie do zbudowania nowoczesnej, oszczędzającej zasoby i konkurencyjnej gospodarki, która w 2050 r. ma osiągnąć zerowy poziom emisji gazów cieplarnianych netto. Skutkiem tych działań jest m.in. szybka transformacja systemu elektroenergetycznego (SEE) przejawiająca się zmianami w sektorze wytwórczym energii elektrycznej [1]. Zastępowanie klasycznych jednostek wytwórczych jednostkami przyłączanymi do sieci przez przekształtniki energoelektroniczne powoduje istotne obniżenie wypadkowej bezwładności SEE i tym samym znaczący wzrost dynamiki zmian częstotliwości, które są określane przez tzw. współczynnik szybkości zmian częstotliwości ROCOF (ang. *Rate of Change of Frequency*) [2,3]. Współczynnik ROCOF to parametr stosowany w dziedzinie elektroenergetyki do oceny stabilności częstotliwościowej SEE. Utrzymanie odpowiedniego poziomu tej stabilności jest niezbędne do zapewnienia stabilnych warunków pracy SEE i tym samym niezawodnych dostaw energii do odbiorców.

W SEE o niskiej wartości ROCOF w stanach przejściowych występuje duże ryzyko podziału systemu z możliwością wyłączenia jego fragmentów (ang. *black-out*). Problem ten został już zidentyfikowany i obecnie wprowadzanych jest szereg regulacji z wykorzystaniem współczynnika ROCOF [4,5]. Zależnie od ścieżki formułowania wymagań, regulacje te są publikowane przez operatorów SEE poszczególnych krajów, lub – np. w ramach Unii Europejskiej – w kodeksach sieci w randze rozporządzenia Komisji. Obecnie procedowana jest aktualizacja kodeksów sieci, w której będą wielokrotnie odniesienia do wymaganych zdolności technicznych opisanych współczynnikiem ROCOF. Jak się zakłada, opublikowane tam wymagania mają gwarantować stabilną i bezpieczną pracę SEE.

Współczynnik ROCOF należy obecnie traktować jako jeden z kluczowych wskaźników warunkujących funkcjonowanie SEE, zatem metodyki jego wyznaczania powinny być spójne. Przeprowadzone w tym temacie wstępne studia literaturowe i dialogi techniczne z producentami urządzeń elektroenergetycznych oraz

dyskusje w ramach grup roboczych ENTSO-E, których członkami są autorzy niniejszego artykułu, pozwoliły zidentyfikować następujące wyzwania:

- istotny wzrost znaczenia ROCOF w różnego rodzaju obszarach związanych z funkcjonowaniem SEE;
- brak szeroko stosowanych i powszechnie akceptowanych standardów wyznaczania ROCOF;
- stosowanie odmiennych metodyk i algorytmów wyznaczania ROCOF (wielkości bazowej w postaci częstotliwości) przez różnych producentów urządzeń elektrycznych i energoelektronicznych.

Brak tych ustaleń generuje istotne ryzyko niespójności uzyskiwanych wyników ROCOF, w szczególności wyznaczanych dla stanów przejściowych SEE.

Mając na uwadze przytoczone wyzwania, przeprowadzono wstępne badania symulacyjne. Niestety, badania te wykazały znaczące rozbieżności w wyznaczonych wartościach ROCOF w zależności od zastosowanego algorytmu i jego parametrów. Wybrane wyniki tych badań przedstawiono w niniejszym artykule.

## Obszary zastosowań ROCOF

W analizie właściwości systemów elektroenergetycznych ROCOF jest traktowany jako jeden z kluczowych współczynników warunkujących poprawność funkcjonowania planowanych struktur tych systemów. Zastosowanie współczynnika ROCOF obejmuje kolejne nowe obszary funkcjonowania SEE [1-5], takie jak::

- identyfikacja pracy wyspowej;
- określanie progu rozruchowego automatyki samoczynnego częstotliwościowego odciążenia;
- aktywacja usługi regulacyjnej w postaci szybkiej odpowiedzi częstotliwościowej powodującej, w zależności od kierunku zmian częstotliwości, wzrost lub obniżenie wartości generowanej mocy przez jednostki wytwórcze;
- określenie poziomu stabilności SEE;
- określanie wymaganych zdolności technicznych urządzeń i obiektów współpracujących z SEE, w tym

jednostek wytwórczych i systemów HVDC (ang. *High Voltage Direct Current*).

Tak szeroki obszar zastosowań ROCOF jest efektem transformacji SEE, dla którego szybkość zmian częstotliwości będzie kluczowym determinanem warunkującym spójność funkcjonowania całego SEE i tym samym pozwoli na utrzymanie odpowiedniego poziomu stabilności pracy SEE. Stanowiło to istotną przesłankę do zastanowienia się nad sposobami wyznaczania wartości ROCOF oraz przeprowadzenia pogłębionej analizy określającej rozbieżności, jakie mogą występować pomiędzy wynikami uzyskanymi z różnych metod wyznaczania tego współczynnika.

### Algorytm wyznaczania ROCOF

W referacie przedstawiono wybrane wyniki analizy porównawczej dwóch metod wyznaczania współczynnika ROCOF, który jest definiowany jako pochodna funkcji opisującej częstotliwość  $f$  napięcia w czasie  $t$ :

$$(1) \quad ROCOF = \frac{df(t)}{dt}$$

W algorytmie wyznaczenia ROCOF można wyodrębnić dwie fazy: proces wyznaczania funkcji częstotliwości  $f$  oraz proces wyznaczania jej pochodnej. Każdy z tych procesów w praktyce może wykorzystywać różne algorytmy – w zależności od potrzeb i cech, którymi powinien się on charakteryzować.

W praktyce pomiar częstotliwości realizowany jest przez pomiar różnicy czasu między przejściami przez zero przebiegu napięcia przemiennego [6-8]. Zatem wartości częstotliwości można określić, mierząc kilka kolejnych przejść przez zero tego przebiegu. Czas potrzebny na to działanie w SEE o częstotliwości znamionowej napięcia 50 Hz wynosi 40 ms [9]. Z powodu zaburzeń występujących w SEE, w procesie pomiaru stosowane są różnego rodzaju filtry uwzględniające fakt, że częstotliwość mieści się w stosunkowo wąskim paśmie bliskim 50 Hz. Użycie tych filtrów powoduje, że pomiar częstotliwości jest realizowany w znacznie dłuższym oknie pomiarowym [8].

Inna metoda, umożliwiająca szybszy pomiar częstotliwości, polega na przeniesieniu wyników pomiaru częstotliwości przebiegu napięcia z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera FFT (ang. *Fast Fourier Transform*) [6-9]. Metoda ta jednak jest również wrażliwa na czynniki zaburzające pomiar częstotliwości. Wystąpienie zakłócenia zwarciego w pobliżu punktu pomiaru może spowodować zniekształcenie badanego przebiegu napięcia, powodując niepoprawne wykrycie przejścia przez zero i w konsekwencji niepoprawny pomiar częstotliwości. Dodatkowo, poziom tego błędu jest zależny m.in. od charakteru zwarcia. Także zjawiska oscylacji podsynchronicznych mogą wywoływać takie zmiany częstotliwości, które należy traktować jako błędy pomiaru tej wielkości. [10]

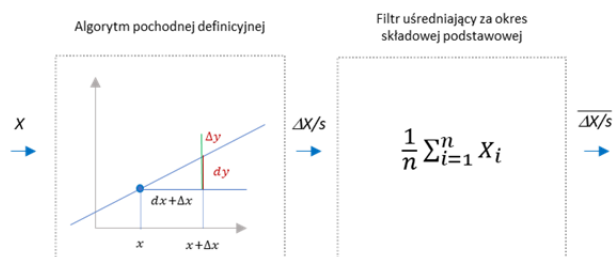
Reasumując, należy podkreślić, że przed podjęciem decyzji o wyborze metody pomiaru częstotliwości i jej pochodnej oraz doborze parametrów algorytmów przetwarzania danych pomiarowych, przykładowo dotyczących okna czasowego pomiaru, należy rozważyć ich wrażliwość na spodziewane zakłócenia. W szczególności dotyczy to sytuacji, gdy ROCOF jest wykorzystywany w systemach automatyki elektroenergetycznej podejmujących decyzje o pracy określonego obiektu elektroenergetycznego lub mających wpływ na stabilność SEE (np. sterowanie systemów HVDC).

Zgodnie z powyższymi uwagami badania symulacyjne metod wyznaczenia częstotliwości zrealizowano z

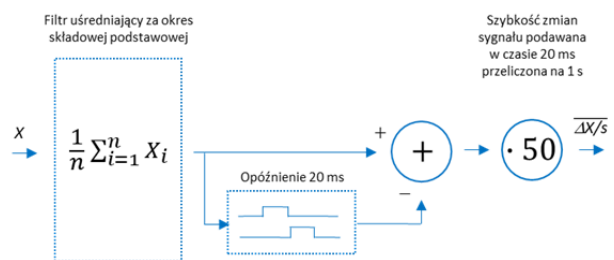
wykorzystaniem splotu sygnałów ortogonalnych pochodzących z filtracji cyfrowej z ortogonalizacją - szczegółowy opis tej metodyki znajduje się m.in. w [9]. Podejście to odwzorowuje odpowiednie algorytmy pomiarowe implementowane w rzeczywistych układach elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Natomiast do wyznaczenia pochodnej mierzonej częstotliwości dla celów współczynnika ROCOF zastosowano dwa różnego rodzaju algorytmy:

- algorytm uśrednionej pochodnej definicyjnej nazywany dalej *algorytmem pochodnej definicyjnej*;
- algorytm uśrednionej pochodnej wyznaczonej metodą opóźnienia nazywany algorytmem pochodnej opóźnionej.

Szczegółową ideę i opis tych algorytmów przedstawiono na rysunku 1 i rysunku 2 odpowiednio dla algorytmu pochodnej definicyjnej oraz algorytmu pochodnej wyznaczonej metodą opóźnienia. Należy podkreślić, że algorytmy te stosowane są m.in. przez producentów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.



Rys.1. Algorytm pochodnej definicyjnej: schemat blokowy algorytmu, kod skryptu realizującego algorytm

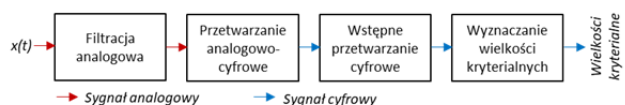


Rys.2. Algorytm pochodnej obliczanej metodą opóźnienia: schemat blokowy algorytmu, kod skryptu realizującego algorytm

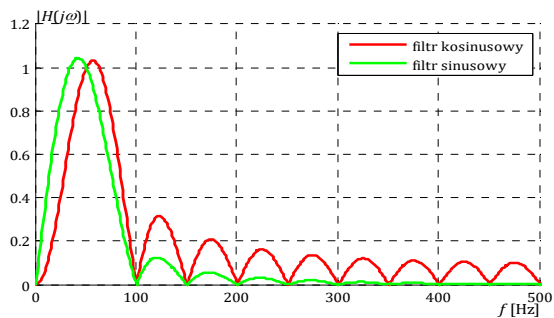
### Model dla celów badań symulacyjnych

Badania symulacyjne przeprowadzono przy użyciu środowiska języka MATLAB, z wykorzystaniem funkcji dedykowanych do modelowania i symulacji układów ciągłych i dyskretnych. Opracowano następujące modele cząstkowe: model będący podstawą algorytmu wyznaczania częstotliwości i modele dla celów rozpatrywanych algorytmów wyznaczania ROCOF.

Założenia przyjęte podczas opracowywania modeli symulacyjnych dotyczyły odwzorowania struktury przetwarzania sygnałów oraz procedur wyznaczania wielkości kryterialnych wykorzystywanych w systemach elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Odwzorowywaną strukturę przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat blokowy zastosowanego toru przetwarzania sygnałów a potrzeby wyznaczania ROCOF



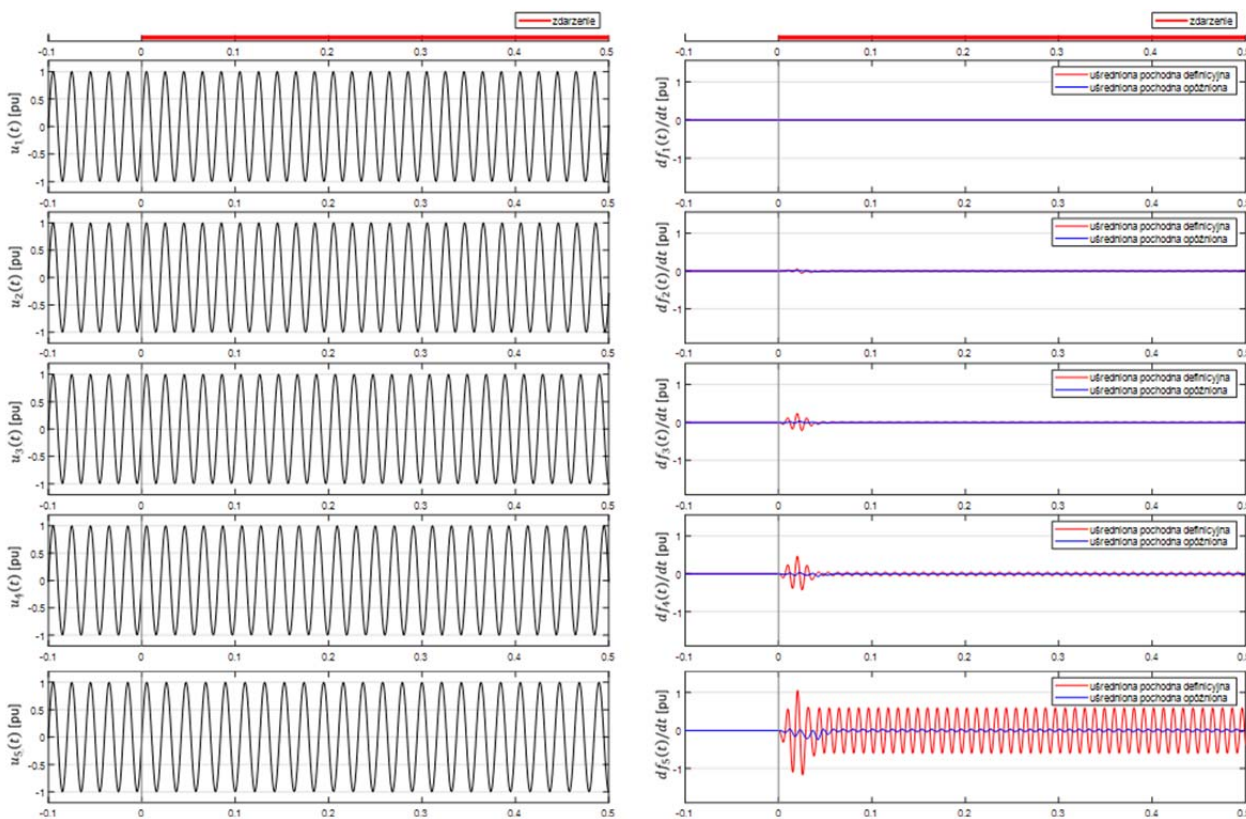
Rys. 4. Transmitancja widmowa zamodelowanej pary filtrów ortogonalnych wykorzystywanych w bloku wstępnego przetwarzania cyfrowego

W strukturze toru przetwarzania sygnałów na uwagę zasługuje w szczególności blok wstępnego przetwarzania cyfrowego oraz blok wyznaczania wielkości kryterialnych. W bloku wstępnego przetwarzania cyfrowego realizowana jest filtracja cyfrowa z ortogonalizacją (rys. 4) [9]. Natomiast w bloku wyznaczania wielkości kryterialnych zastosowane zostały algorytmy wyznaczania częstotliwości i obliczania pochodnej częstotliwości, zgodnie z metodyką przedstawioną na rysunkach 1 i 2. W zależności od potrzeb realizacji danego scenariusza symulacji wybierano określony algorytm wyznaczania pochodnej.

Tabela 1. Uzyskane krytyczne wartości ROCOF dla dwóch metod wyznaczania tego współczynnika i różnych sygnałów wejściowych

Scenariusz	ROCOF - kryterium pochodnej definicyjnej			ROCOF – kryterium pochodnej opóźnionej		
	$\Delta df_{max}$ , w pu	$t_{dmax}$ , w ms	przydatność	$\Delta df_{max}$ , w pu	$t_{dmax}$ , w ms	przydatność – tność
Sygnal $u_1(t)$   sygnał odniesienia*	0	0	---*	0	0	----*
Sygnal $u_2(t)$   $\Delta f = -0,1$ Hz w $t = 0$ s	-0,058	25	Tak	0,014	22	Tak
Sygnal $u_3(t)$   $\Delta f = -0,5$ Hz w $t = 0$ s	0,24	20	Tak	-0,034	42	Tak
Sygnal $u_4(t)$   $\Delta f = -1,0$ Hz w $t = 0$ s	0,466	20	Nie	-0,067	42	Tak
Sygnal $u_5(t)$   $\Delta f = -2,5$ Hz w $t = 0$ s	-1,17	26	Nie	-0,237	42	Nie
Sygnal $u_6(t)$   $\Delta f = +0,1$ Hz w $t = 0$ s	0,057	15	Tak	0,014	17	Tak
Sygnal $u_7(t)$   $\Delta f = +0,5$ Hz w $t = 0$ s	-0,254	20	Nie	-0,036	38	Tak
Sygnal $u_8(t)$   $\Delta f = +2,5$ Hz w $t = 0$ s	-1,402	20	Nie	-0,275	38	Nie

\* nie dotyczy



Rys.5. Przebiegi sygnału wejściowego i wyjściowego (ROCOF) dla różnych wprowadzanych zaburzeń częstotliwości napięcia

### Uzyskane wyniki badań

Analizę przeprowadzono dla dwóch rozważanych algorytmów wyznaczania ROCOF różniących się metodą wyznaczania pochodnej, przy czym w obydwu przypadkach był zastosowany ten sam algorytm wyznaczania częstotliwości. Wyniki badań wybranych rodzajów symulacji przedstawiono w tabeli 1. Analizowanym sygnałem  $u(t)$  był

sygnał sinusoidalny o częstotliwości 50 Hz (odpowiada to oczekiwanej postaci sygnału napięciowego w SEE). W każdym z badanych przypadków w chwili zero wprowadzono zaburzenie częstotliwości analizowanego sygnału o zadanej wartości wybranej spośród następującego zbioru: -2,5 Hz, -1,0 Hz, -0,5 Hz, -0,1 Hz, 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1,0 Hz, 2,5 Hz i wyznaczano przebieg wartości ROCOF

(rys.5). Dla każdego przebiegu odczytywano maksymalną wartość tego współczynnika oraz czas jej wystąpienia. W tabeli 1 zamieszczono również wyniki analizy wartości ROCOF w sytuacji, gdy po wystąpieniu zaburzenia częstotliwość badanego sygnału osiągnie wartość ustaloną. Uzyskanie wartości ROCOF bliskiej zeru w stanie ustalonym powodowało przypisanie parametrowi *przydatność* atrybut „Tak”, w przeciwnym przypadku przypisywano „Nie”. Parametr „Nie” należy odczytywać jako brak użyteczności określonej metody wyznaczania ROCOF.

Dokonując analizy danych zawartych w tabeli 1 oraz przedstawionych na rysunku 5, stwierdza się, że:

- zarówno algorytm pochodnej definicyjnej, jak i algorytm pochodnej opóźnionej mają istotne wady, a wyznaczone wartości współczynnika ROCOF wykazują bardzo duże rozbieżności dla równoważnych procedur symulacji;
  - w obydwu przypadkach bazowano na tej samej metodzie wyznaczania częstotliwości, dzięki czemu koncentrowano się na identyfikacji wpływu zastosowanego algorytmu wyznaczania pochodnej na wynik;
  - algorytm pochodnej definicyjnej prowadzi do uzyskania znacznie większych wartości ROCOF w chwili wystąpienia zaburzenia i tuż po nim, w porównaniu do algorytmu pochodnej opóźnionej, przy czym różnice wyników poszczególnych metod są bardzo duże i niejednokrotnie przekraczają jeden rząd wartości;
- oba analizowane algorytmy niewłaściwie wyznaczają wartości ROCOF w stanie ustalonym po dużym zaburzeniu częstotliwości (np.  $\pm 2,5$  Hz), przy czym algorytm pochodnej opóźnionej wykazuje większą niewrażliwość na tego typu zaburzenie – znaczące wartości ROCOF dla tej metody pojawiają się dopiero dla zaburzenia – 2,5 Hz, podczas gdy dla algorytmu pochodnej definicyjnej ROCOF osiągają znaczące wartości już dla zaburzenia (-1,0 Hz).

#### Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona symulacyjna analiza porównawcza metod wyznaczania ROCOF wykazała znaczące rozbieżności w uzyskanych wynikach w zależności od zastosowanego algorytmu. Różnice w uzyskanych wartościach ROCOF dla równoważnych procedur symulacji są bardzo duże, co w praktyce będzie powodować duże problemy podczas ich porównywania, np. na potrzeby oceny stabilności częstotliwościowej SEE.

Różna wrażliwość analizowanych algorytmów na występujące zaburzenia częstotliwości oraz duża niedokładność wyznaczania wartości ROCOF w stanie ustalonym, występująca w szczególności przy dużych odchyleniach częstotliwości w granicach 2,5 Hz, powoduje, że w praktyce metody te nie powinny być stosowane.

Uzyskane wyniki wskazują, że należy kontynuować prace mające na celu wytypowanie algorytmów najbardziej

odpowiednich dla pomiaru wartości współczynnika ROCOF wykorzystywanego dla potrzeb określania i poprawy stabilności częstotliwościowej SEE. Niezbędne jest również dalsze prowadzenie prac nad określeniem jednolitego standardu wyznaczania ROCOF dla określonych obszarów zastosowań. Należy podkreślić, że wprowadzenie dokładnej formuły wyznaczania algorytmu ROCOF nie powinno spowodować wzrostu nakładów inwestycyjnych, gdyż nie wprowadza to istotnych zmian w strukturze technologicznej urządzeń.

Sformułowane wnioski mają szczególne znaczenie w obliczu prognoz dotyczących zmian dynamiki pracy SEE wynikających z występującej szybkiej transformacji tych systemów, dla których coraz ważniejsza staje się kwestia zachowania się poszczególnych obiektów w stanach przejściowych.

**Autorzy:** dr. inż. Piotr Rzepka, dr inż. Mateusz Szablicki, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [piotr.rzepka@polsl.pl](mailto:piotr.rzepka@polsl.pl).

#### LITERATURA

- [1] Raport pt. The Ten-Year Network Development Plan – Analiza potrzeb systemu europejskiego. Dostęp on-line: [www.entsoe.eu/publications/tyndp](http://www.entsoe.eu/publications/tyndp) (08.05.2023 r.)
- [2] Raport ENTSO-E: High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources and the Potential Contribution of Grid Forming Converters. 2028 Dostęp on-line: <https://www.entsoe.eu/>
- [3] Szablicki M., Rzepka P., Halinka A., Sowa P., Diagnosis of challenges for power system protection – selected aspects of transformation of power systems, *Modern Electric Power Systems 2019 (MEPS)*, 1-5
- [4] Chan K., Oesterheld J., Temtem S., Haldemann J.: Investigations on ROCOF withstand capability on large synchronous generators. A1-102, CIGRE 2018,
- [5] Raport ENTSO-E: Rate of Change of Frequency (RoCoF) Withstand Capability. 31 January 2028 Dostęp on-line: <https://www.entsoe.eu/>
- [6] Chown G.A., Wright J.G., Van Heerden R., COKER M.: System inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF) with increasing non-synchronous renewable energy penetration. Available. Innovation in the Power Systems Industry. CIGRE , ISSN : 1286-1146
- [7] Halinka A. Talaga M.: Wybrane metody cyfrowego pomiaru częstotliwości w systemie elektroenergetycznym. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr.3, 2016
- [8] Rietveld G., Wright P., Roscoe A.: Reliable Rate-of-Change-of-Frequency Measurements: Use Cases and Test Conditions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 69, no. 9, September 2020
- [9] Szafran J., Wiszniewski A.: Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej. WNT 2021
- [10] Rzepka P., Szablicki M., Halinka A i in.: Oscylacje subharmoniczne w wymaganiach kodeksów sieci, W: *Blackout a krajowy system elektroenergetyczny: 2018*, s.165-178, ISBN 978-83-7712-192-4