

Dokładność wyznaczania synchronfazorów - porównanie symulacji i pomiarów

Streszczenie. W artykule przedstawiono fragmenty badań, które były prowadzone w ramach doktoratu wdrożeniowego zatytułowanego „System pozyskiwania, testowania i przetwarzania synchronfazorów w sieciach średniego i niskiego napięcia”. Zaprezentowana została metodologia oraz analiza precyzji wyznaczania synchronfazorów z pomiarów dokonywanych przez opracowane PMU na zgodność ze standardem IEC/IEEE 60255-118-1. Opisano stworzone do tego celu stanowisko do testowania. Dokonana została analiza dokładności wyznaczania synchronfazorów, w ramach której wyniki pomiarów opracowanego PMU porównano z wynikami symulacji precyzji wyznaczania synchronfazorów dla zastosowanego algorytmu.

Abstract. The article presents fragments of research that was carried out as part of an implementation doctorate entitled “System for acquiring, testing and processing synchrophasors in medium and low voltage networks”. The methodology and measurement results as well as the analysis of the precision of synchrophasors determination by the developed PMU for compliance tests with the IEC/IEEE 60255-118-1 standard are presented. A test stand created for this purpose is described. The synchrophasor values obtained from measurement results are compared with those obtained by simulations. (**Accuracy of synchrophasor determination - comparison of simulations and measurements**)

Słowa kluczowe: synchronfazory, synchronfazorowe urządzenie pomiarowe, precyzja wyznaczania synchronfazorów, EAZ.
Keywords: synchrophasor, Phasor Measurement Unit, compliance tests.

Wstęp

Synchronfazor jest wektorem sygnału fizycznego prądu lub napięcia, który został wyznaczony w ściśle określonym czasie względem czasu UTC (ang. *Coordinated Universal Time*). Synchronfazory pozwalają na monitorowanie i analizę stanu i dynamiki systemu zasilania w czasie rzeczywistym, co ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia niezawodności i stabilności sieci [1]. Wyznaczane są one przez urządzenia pomiarowe PMU (ang. *Phasor Measurement Unit*), które są rozmieszczone w strategicznych punktach sieci. PMU wysyłają synchronfazory do centrów kontroli i przetwarzania danych, gdzie są one wykorzystywane do różnych zastosowań, takich jak detekcja i lokalizacja zakłóceń [2], ocena stabilności napięcia i częstotliwości [3], optymalizacja przepływu mocy i koordynacja zabezpieczeń [4].

Precyzja wyznaczania synchronfazorów jest kluczowym czynnikiem wpływającym na użyteczność pomiarów dokonywanych przez PMU. Precyzja ta zależy od wielu czynników, takich jak dokładność synchronizacji czasu [5], charakterystyka sygnału wejściowego na którą składają się zakłócenia sieciowe i warunki dynamiczne oraz algorytm wyznaczania synchronfazorów. Aby zapewnić wiarygodność i porównywalność pomiarów, istnieją międzynarodowe standardy określające wymagania dotyczące parametrów PMU oraz metody testowania ich zgodności. Przykładem takiego standardu jest IEC/IEEE 60255-118-1-2018 [6], który definiuje szereg parametrów jakościowych synchronfazorów takich jak całkowity błąd wektorowy (TVE), błąd częstotliwości (FE) i błąd oszacowania prędkości zmiany częstotliwości (RFE) oraz określa kryteria oceny tych parametrów w warunkach statycznych i dynamicznych.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie metodologii i wyników badań dotyczących precyzji wyznaczania synchronfazorów na zgodność ze standardem IEC/IEEE 60255-118-1-2018. W ramach badań stworzono stanowisko do testowania PMU, które umożliwia generowanie sygnałów napięciowych o różnych parametrach, poziomie zakłóceń oraz estymację błędów wyznaczania synchronfazorów [7]. Wartości synchronfazorów wyznaczone na podstawie wyników pomiarów zostały porównane z wartościami wyznaczonymi na drodze symulacji z zastosowaniem rozpatrywanego algorytmu.

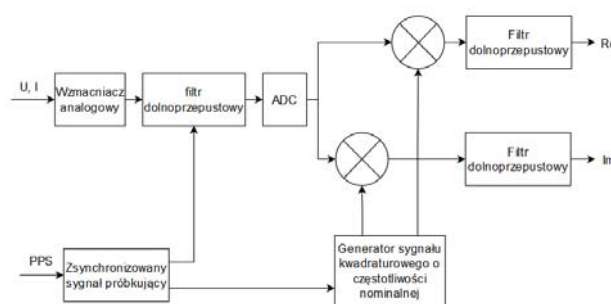
Prototyp urządzenia PMU [8], który podlegał badaniom, został opracowany do zastosowania w sieciach rozdzielczych średniego napięcia. Cechuje się on modułową konstrukcją

na którą składają się cztery trójfazowe karty do pomiarów synchronicznych oraz cztery karty wejść i wyjść dwustanowych.

Powodem prowadzenia badań nad PMU do zastosowania w sieciach rozdzielczych średniego napięcia jest potrzeba zwiększenia jej obserwowalności, co jest warunkiem koniecznym do sprostania wyzwaniom jakie niesie za sobą heterogeniczny model sieci elektroenergetycznej, do którego mierzymy [9,10].

Algorytm wyznaczania synchronfazora.

Standard IEC/IEEE 60255-118-1-2018 podaje przykład implementacji procedury wyznaczania synchronfazora (rys. 1) dla urządzenia PMU klasy P (ang. *Protection*) czyli zabezpieczeniowego. Jest to jedna z metod estymacji w dziedzinie czasu. Polega ona na przemnożeniu próbkowanego sygnału przez sygnał sinus i kosinus o częstotliwości nominalnej sieci energetycznej. Proces próbkowania musi być zsynchronizowany z czasem UTC [11]. Następnie otrzymane w ten sposób dwa strumienie próbek poddawane są filtracji dolnoprzepustowej.



Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania synchronfazora

Model ten opisany jest równaniem:

$$(1) \quad X = \frac{\sqrt{2}}{G} \times \sum_{k=-N/2}^{N/2} x(i+k) \times e^{-j(i+k)\Delta t \omega_0}$$

$$(2) \quad G = \sum_{k=-N/2}^{N/2} W(k)$$

gdzie: $\omega_0 = 2\pi f_0$ gdzie f_0 jest częstotliwością nominalną sieci (50 Hz lub 60 Hz); N - rząd filtru FIR; Δt - odwrotność częstotliwości próbkowania; x_i - próbka w czasie $t = i\Delta t$,

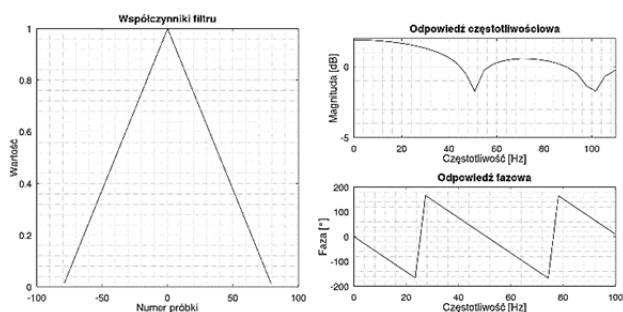
gdzie czas $t=0$ odpowiada pełnej sekundzie czasu UTC; $W(k)$ - współczynniki filtra dolnoprzepustowego

Metodę tą można modyfikować poprzez stosowanie różnych charakterystyk filtrów FIR oraz wprowadzenie dodatkowej kompensacji błędów fazowych.

Ponieważ filtr FIR z charakterystyką trójkątną (rys. 2) posiada odpowiedź impulsową opisaną wzorem $(\sin(x)/2)^2$ występuje błąd estymacji amplitudy fazora przy częstotliwości różnej od nominalnej. W ograniczonym zakresie częstotliwości, błędy te mogą zostać skompensowane poprzez korekcję współczynników $x(i)$ za pomocą wyrażenia:

$$(3) \quad \hat{X}(i) = X(i) / \left[\sin\left(\frac{\pi(f_0 + 1,625\Delta F(i))}{2f_0}\right) \right]$$

gdzie $\Delta F(i)$ jest odchyleniem od częstotliwości nominalnej. Mnożnik 1,625 zależy od szerokości zastosowanego okna i został dobrany eksperymentalnie.



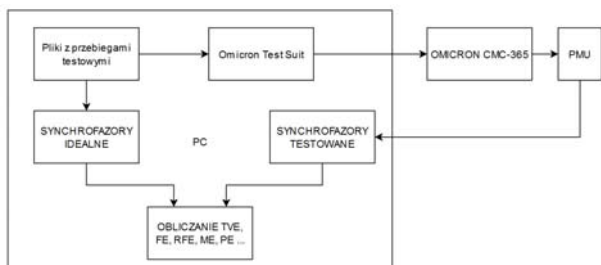
Rys.2. Współczynniki filtra FIR o charakterystyce trójkątnej oraz jego odpowiedzi częstotliwościowa i fazowa

Stanowisko do testowania PMU

Stanowisko do testowania PMU składa się z następujących elementów:

- Generators Omicron 356, który służy do generowania sygnałów wejściowych o różnych parametrach i poziomie zakłóceń. Generator jest sterowany przez komputer za pomocą oprogramowania Test Universe.
- Prototypowego urządzenia PMU, które wysyła pomiary synchrofazorów do komputera za pomocą protokołu IEC/IEEE 60255-118-1-2018.
- Komputera, który służy do generacji plików w formacie comtrade z przebiegami testowymi, sterowania generatorem, odbierania wyznaczonych wartości synchrofazorów z PMU i obliczania błędów pomiarowych za pomocą oprogramowania MATLAB.
- Zasilacza, który służy do zasilania PMU i generatora.

Schemat stanowiska do testowania PMU jest przedstawiony na rysunku 1.



Rys.3. Schemat stanowiska do testowania synchrofazorów

Przypadki testowe

Standard IEC/IEEE 60255-118-1-2018 dzieli testy na trzy ogólne kategorie, są to:

- Testy statyczne: polegają na generowaniu sygnałów sinusoidalnych o stałej amplitudzie, częstotliwości

oraz fazie i wyznaczaniu błędów TVE (*ang. Total Vector Error*), FE (*ang. Frequency Error*) i RFE (*ang. Rate of change Frequency Error*) dla różnych wartości tych parametrów.

- Testy dynamiczne: polegają na generowaniu sygnałów sinusoidalnych o zmiennej amplitudzie, częstotliwości oraz fazie i wyznaczaniu błędów TVE, FE i RFE dla różnych wartości tych parametrów.

- Testy odpowiedzi czasowej: polegają na generowaniu sygnałów sinusoidalnych o skokowej zmianie amplitudy lub fazy i wyznaczaniu czasu reakcji PMU na tę zmianę.

Na potrzeby badań podzielono testy na następujące szczegółowe kategorie:

- Stan ustalony w przedziale częstotliwości.
- Skokowa zmiana amplitudy.
- Stan ustalony przy częstotliwości nominalnej z udziałem harmonicznych.
- Stan ustalony przy częstotliwości nominalnej z udziałem interharmonicznych.
- Stan ustalony przy częstotliwości nominalnej z modulacją fazy.
- Stan ustalony przy częstotliwości nominalnej z modulacją amplitudy.
- Test dynamiczny, liniowa zmiana częstotliwości.

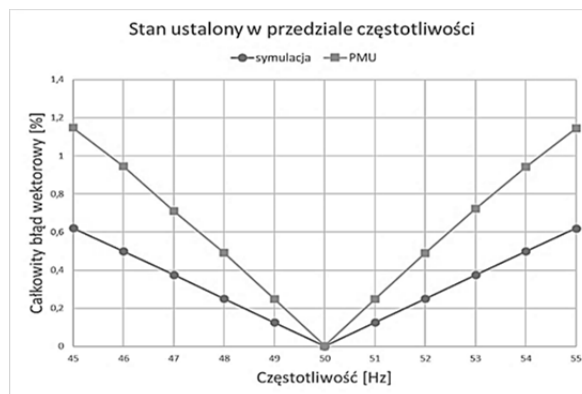
W programie Matlab stworzono funkcje generujące sygnały wejściowe o zadanych parametrach i zakłóceń oraz funkcje obliczające błędy TVE, FE i RFE.

Wyniki

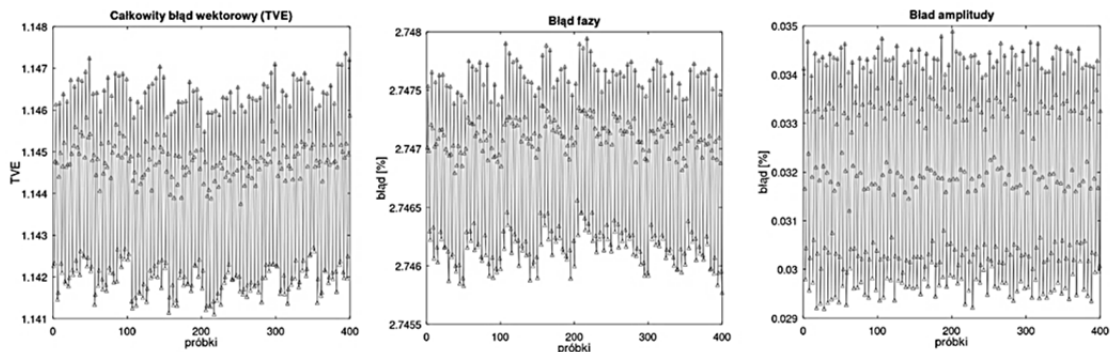
Wyniki badań precyzji wyznaczania synchrofazorów, przyjmując jako kryterium wartość błędu TVE przedstawione są zgodnie z przyjętym podziałem na 6 kategorii. Wartości synchrofazorów wyznaczone z pomiarów zostały porównane z wartościami wyznaczonymi na drodze symulacji dla tego samego dla tego samego algorytmu wyznaczania synchrofazora. Za kryteria oceny jakości przyjęto wymagania dla urządzeń klasy P.

- Stan ustalony w przedziale częstotliwości.
Test ten przeprowadzony został w przedziale częstotliwości 45 – 55 Hz. Na rysunku 4 przedstawiony został błąd TVE obliczony na podstawie symulacji działania algorytmu oraz wyników pomiarów przeprowadzonych przez PMU. Wyniki testu wskazują, że błąd w rzeczywistym urządzeniu jest około 2 krotnie większy niż oszacowany na podstawie symulacji i wraz z oddalaniem się od częstotliwości nominalnej 50 Hz zbliża się do granicznej wartości 1%, aby dla około 45,8 i 54,2 Hz ją przekroczyć.

Aby bliżej zbadać charakter błędu TVE rozłożono go na procentowy błąd amplitudy oraz fazy i przedstawiono na rysunku 5.



Rys.4. Wyniki uzyskane dla testu w stanie ustalonym w przedziale częstotliwości

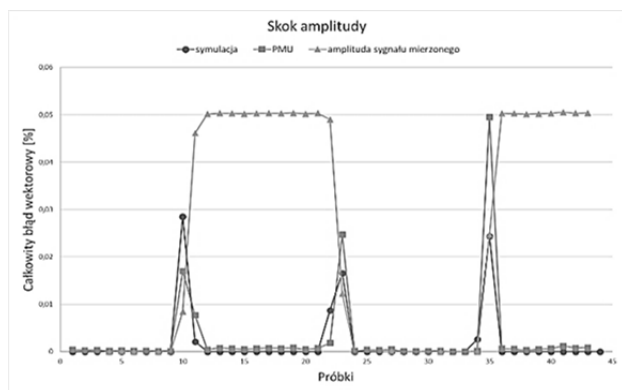


Rys.5. Wyniki uzyskane dla testu w stanie ustalonym dla częstotliwości 45 Hz przedstawiający TVE, błąd fazy i błąd amplitudy dla każdego synchronofazora niezależnie w ujęciu procentowym

Na wzrost błędu wyznaczania synchronofazorów w rzeczywistym urządzeniu względem symulacji wpływa głównie błąd fazy. Błąd TVE dla częstotliwości 50 Hz jest pomijalnie mały, a przeprowadzona analiza pokazuje, że na powstały błąd fazy nie składa się błąd wynikający z błędów synchronizacji czasu i generacji sygnału próbkującego. Główny wpływ na wartość błędu ma charakterystyka zastosowanego filtra FIR, o piłokształtnej odpowiedzi fazowej (rys. 2) i tylko dla częstotliwości nominalnej filtr ten nie wprowadza istotnego składnika błędów wyznaczania synchronofazora. W celu zmniejszenia błędów TVE należy zmodyfikować filtr FIR. Można to zrobić poprzez zmianę jego charakterystyki, bądź wprowadzenie kompensacji fazy zależnej od chwilowej częstotliwości sygnału wejściowego. Dla przyjętej kategorii urządzeń badane PMU spełnia wymagania standardu, który określa, że w przedziale 48-52 Hz błąd TVE znajduje się poniżej 1%.

b. Skokowa zmiana amplitudy.

Test ten przeprowadzono dla sygnału o częstotliwości nominalnej 50 Hz z amplitudą skoku wynoszącą 10%. Uwzględniono przypadek amplitudy rosnącej i malejącej.

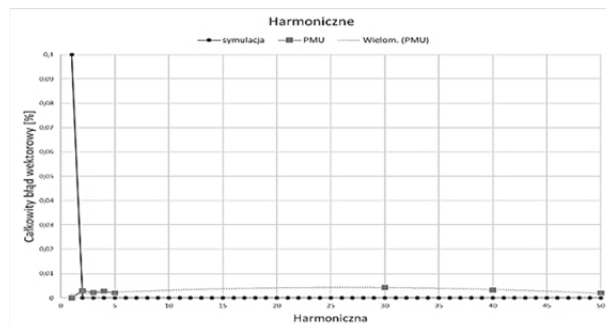


Rys.6. Wyniki uzyskane dla testu skokowej zmiany amplitudy

Standard IEEE dopuszcza w tym przypadku wystąpienie błędów TVE mniejszego niż 0,1%. Wyniki uzyskane na drodze symulacji są około 4 krotnie lepsze od tych uzyskanych z pomiarów, jednakże badane PMU spełnia w tym przypadku wymagania standardu.

c. Stan ustalony przy częstotliwości nominalnej (50 Hz) z udziałem harmonicznych

W teście tym, badaniu podlega pasmo zaporowe algorytmu. Sygnałem podstawowym jest tu sygnał w stanie ustalonym dla stałej amplitudy i częstotliwości nominalnej sieci. Do sygnału podstawowego dodawany jest sygnał o częstotliwości harmonicznej i amplitudzie wynoszącej 1% amplitudy sygnału podstawowego. Badanie przeprowadzono w zakresie od pierwszej do pięćdziesiątej harmonicznej.

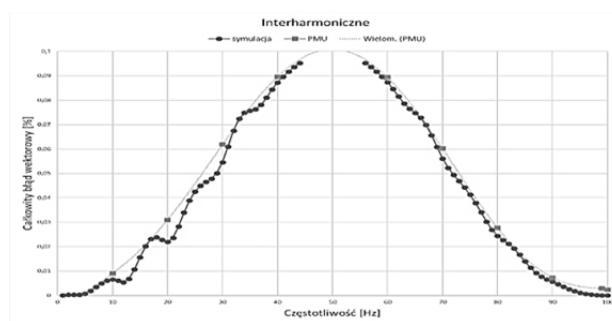


Rys.7. Wyniki uzyskane dla testu z udziałem harmonicznych

Wyniki uzyskane na drodze symulacji i pomiarów, przedstawione na rysunku 7 są bardzo zbliżone i dalekie od limitu błędów TVE wynoszącego 1%. Wynik testu jest pozytywny.

d. Stan ustalony przy częstotliwości nominalnej (50 Hz) z udziałem interharmonicznych

W teście tym, badaniu podlega pasmo zaporowe algorytmu w obszarze bliskim pasmu przepustowemu. Sygnałem podstawowym jest tu sygnał w stanie ustalonym o stałej amplitudy i częstotliwości nominalnej sieci. Do sygnału podstawowego dodawany jest sygnał o częstotliwości od 10 do 100 Hz z pominięciem częstotliwości z przedziału 45-55 Hz i amplitudzie wynoszącej 1% amplitudy sygnału podstawowego. Standard precyzuje częstotliwości dodawanych składników sygnału i uzależnia je od częstotliwości obliczania synchronofazorów. Podczas symulacji przyjęto rozdzielczość 1Hz, a dla rzeczywistych pomiarów 10 Hz.

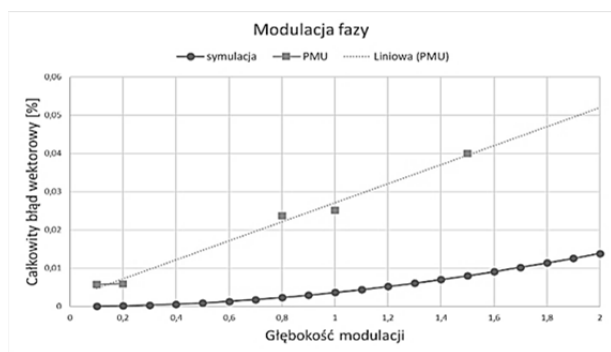


Rys.8. Wyniki uzyskane dla testu z udziałem interharmonicznych

Wyniki symulacji i pomiarów są zbliżone, a błąd dużo niższy niż limit narzucony przez standard dla urządzeń klasy M wynoszący 1,3% TVE. Standard nie podaje limitu dla urządzeń klasy P.

e. Stan ustalony na częstotliwości nominalnej (50 Hz) z modulacją fazy.

W trakcie tego testu sygnał o stałej amplitudzie i częstotliwości 50 Hz podlega modulacji fazy. Test przeprowadza się dla różnych głębokości modulacji od 0,1 % do 2 %.

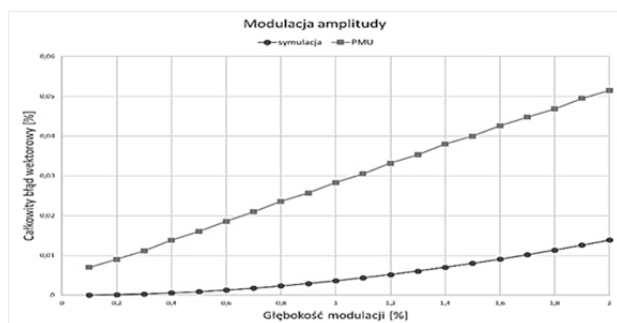


Rys.9. Wyniki uzyskane dla testu z modulacją fazy

Wyniki przedstawione na rysunku 9 wskazują, że błąd TVE wyznaczenia synchronizatora na podstawie pomiarów dla badanego urządzenia jest większy od błędu TVE wyznaczenia synchronizatora na drodze symulacji, jednakże nieznaczący w stosunku do limitu błędu TVE wymaganego przez standard, który wynosi 1%.

f. Stan ustalony przy częstotliwości nominalnej (50 Hz) z modulacją amplitudy.

W trakcie tego testu sygnał o stałej częstotliwości 50 Hz podlega modulacji amplitudy. Test przeprowadza się dla różnych głębokości modulacji od 0,1 % do 2 %.



Rys.11. Wyniki uzyskane dla testu z modulacją amplitudy

Tabela 1. Zestawienie TVE podczas testu z opadającą i narastającą częstotliwością.

Rodzaj testu	TVE symulacja [%]	TVE PMU [%]
Narastający	0,000511	0,491767
Opadający	0,000284	0,489945

Wartości estymacji błędu TVE otrzymane podczas przeprowadzania testów z modulacją amplitudy i fazy są podobne. W obydwu przypadkach błąd TVE gdy synchronizator jest wyznaczony z pomiarów jest większy od błędu TVE powstałego na drodze symulacji, jednakże znacząco mniejszy od limitu błędu TVE wymaganego przez standard, który wynosi 1%.

g. Test dynamiczny, liniowa zmiana częstotliwości.

Test liniowej zmiany częstotliwości przeprowadzany jest dla sygnału o narastającej i opadającej częstotliwości, w przedziale od 48 do 52 Hz i stałej amplitudzie. Pełne zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 1. Obejmują one symulację i pomiary na stanowisku testowym dla przypadku narastającej i opadającej częstotliwości mierzonego sygnału. Z testu wynika, że błąd estymacji synchronizatora przez urządzenie PMU jest znacząco większy od błędu jego estymacji gdy był on wyznaczany na drodze symulacji, ale jest on wciąż około 2 razy mniejszy od

maksymalnego błędu dopuszczanego przez standard wynoszącego 1%.

Podsumowanie.

Kryteria dotyczące precyzji wyznaczania synchronizatora zdefiniowane w standardzie IEC/IEEE 60255-118-1-2018 są złożone i wymagają wykonania dużej liczby pomiarów. Do generacji sygnałów testowych konieczne jest wykorzystanie generatorów odtwarzających sygnał analogowy z danych cyfrowych, które z kolei muszą zostać wygenerowane przy pomocy dedykowanego oprogramowania, bądź jak w tym przypadku przy pomocy oprogramowania typu Matlab. Jest to konieczne ze względu na potrzebę posiadania informacji o chwilowej amplitudzie i fazie wymuszonego sygnału w celu oszacowania błędu TVE.

Kolejnym aspektem, który został poruszony w tym artykule jest porównanie wyników jakie osiąga omawiany algorytm generacji synchronizatora w urządzeniu PMU z wynikami uzyskanymi na drodze symulacji na podstawie tych samych przebiegów analogowych. Wyniki porównania podzielić można na dwie kategorie tj. porównywalne oraz znacząco gorsze względem symulacji, ale spełniające kryteria standardu. Z badań wynika, iż PMU z zaimplementowanym algorytmem opisanym w artykule spełnia kryteria standardu dla przedstawionych scenariuszy testowych.

Autorzy: mgr inż. Karol Makowiecki, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: karol.makowiecki@itr.lukasiewicz.gov.pl; dr inż. Aleksander Lisowiec, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: aleksander.lisowiec@itr.lukasiewicz.gov.pl; dr hab. inż. Marcin Habrych prof. Uczelni, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektryki, ul. Janiszewskiego 8, Wrocław, E-mail: marcin.habrych@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Richter M., Wolter M., Naumann A., Komarnicki P., Practical Experiences on PMU-based Linear State Estimation in Distribution Grids, in Proc. of 2016 IEEE PES General Meeting, Boston, MA (2016).
- [2] Timofeev, D. M., & Klimova, T. G. (2018, September). Analysis of Possibility of Using PMU Based Methods for Providing the Correct Operation of Distance Protection. 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA) (pp. 1-14). IEEE.
- [3] Pavicic, I.; Holjevac, N.; Ivankovic, I.; Brnobic, D. Model for 400 kV Transmission Line Power Loss Assessment Using the PMU Measurements. *Energies* 2021, 14, 5562.
- [4] Paramo, G.; Bretas, A.; Meyn, S. Research Trends and Applications of PMUs. *Energies* 2022, 15, 5329.
- [5] Makowiecki K., Lisowiec A., Michalski P., Habrych M. UTC Synchronized Signal Generation for Synchronphasors and Sampled Values Measurements. *Energies* 2022, 15, 7095.
- [6] IEC/IEEE Standard 60255-118-1, "Measuring relays and protection equipment – Part 118-1: Synchronphasor for power systems – Measurements"
- [7] M. S. Almas, J. Kilter, L. Vanfretti, Experiences with Steady-State PMU Compliance Testing Using Standard Relay Testing Equipment, *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, IEEE Xplore*, 26.06.2014, DOI: 10.1109/PQ.2014.6866793
- [8] Makowiecki K., Lisowiec A., Habrych M., Modułowe PMU dla sieci dystrybucyjnych SN, *Wiadomości Elektrotechniczne*, Rocznik 2022, Tom, R. 90, nr 4, DOI 10.15199/74.2022.4.1
- [9] Lagos D., Papaspiliotopoulos V., Korres G. and Hatzigiorgiou N., "Microgrid Protection Against Internal Faults: Challenges in Islanded and Interconnected Operation," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 19, no. 3, pp. 20-35, May-June 2021, doi: 10.1109/MPE.2021.3057950.
- [10] Espina, E., Llanos, J., Burgos-Mellado, C., Cardenas-Dobson, R., Martinez-Gomez, M., & Sáez, D. Distributed control strategies for microgrids: An overview. *IEEE Access*, 2020, 8, 193412-193448.
- [11] Arceo-Miquel, L.; Shmaliy, Y.S.; Ibarra-Manzano, O. Optimal synchronization of local clocks by GPS 1PPS signals using predictive FIR filters. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2009, 58, 1833–1840.