

## Symulacja wpływu odnawialnych źródeł energii na zmienność wartości skutecznej napięcia sieci dystrybucyjnej

**Streszczenie.** W artykule zaproponowano zastosowanie oprogramowania OpenDSS do komputerowej symulacji pracy sieci dystrybucyjnej w celu estymacji wartości skutecznej napięcia w nieopomiarowanych punktach sieci. Zaproponowane narzędzie umożliwia wsparcie operatorów systemów dystrybucyjnych w monitorowaniu i diagnostyce pracy ich sieci. Wyniki pomiarów oraz symulacji zostały porównane dla wybranego obszaru systemu dystrybucyjnego na poziomie średniego napięcia. Na podstawie zarejestrowanych danych pochodzących z elektrowni fotowoltaicznej wykonano symulację wpływu przyłączenia oze do badanego fragmentu sieci.

**Abstract.** The article proposes the use of OpenDSS software for computer simulation of distribution network operation in order to estimate the RMS voltage at unmetered network points. The proposed tool enabled the support of distribution system operators in monitoring and diagnostics of their network operation. The results of measurements and simulations of the selected area of the distribution system at the medium voltage level were compared. Based on the recorded data from the solar farm, a simulation of the impact of connecting renewable energy sources to the tested part of the network was made. **The use of OpenDSS software for computer simulation of distribution network operation**

**Słowa kluczowe:** odnawialne źródła energii, symulacja pracy systemu dystrybucyjnego, propagacja wartości skutecznych napięcia, wpływ OZE na sieć

**Keywords:** renewable energy sources, simulation of distribution system operation, voltage propagation, renewable energy impact on the grid.

### Wstęp

Dynamicznie zwiększająca się liczba rozproszonych źródeł energii takich jak elektrownie wiatrowe, a w ostatnim czasie również prosumenckie instalacje fotowoltaiczne stawiają przed operatorami systemów dystrybucyjnych (OSD) nowe wyzwania. Utrzymanie jakości dostawy energii elektrycznej (JDEE) zgodnie z Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego wymusza budowę nowych oraz rozbudowę istniejących systemów pomiarowych, ponieważ brak wiedzy na temat stanu bieżącego uniemożliwia wdrożenie narzędzi naprawczych. Inwestycja w rozległe systemy pomiarowe związana jest ze znacznymi nakładami finansowymi na ich budowę, a także utrzymanie. Połączenie symulacji komputerowych pozwalających na przykład na estymację wartości skutecznej napięcia w nieopomiarowanych punktach oraz systemu pomiarowego może pozwolić na ograniczenie tych kosztów. Powiązanie dwóch systemów pozwala na znaczne ograniczenie liczby koniecznych do zainstalowania urządzeń pomiarowych.

### Model sieci elektroenergetycznej

Istotnym elementem procesu symulacyjnego jest budowa samego modelu sieci elektroenergetycznej. Nie jest to jednak jedyny etap pozwalający na estymację wartości skutecznej napięcia. Na rysunku 1 zaprezentowano etapy konieczne do wykonania symulacji.

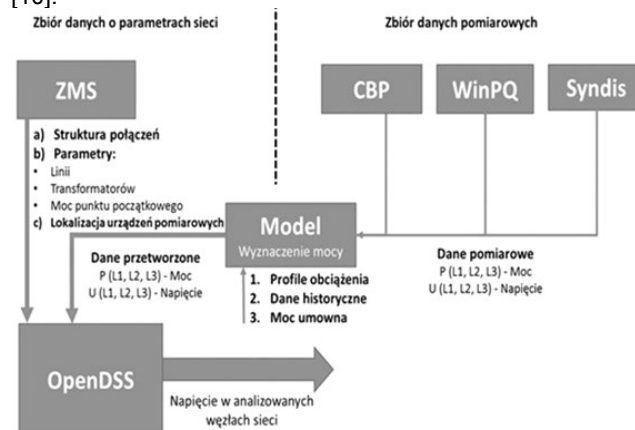


Rys. 1. Etapy procesu symulacyjnego

Model sieci powinien odwzorowywać stan bieżący analizowanego fragmentu systemu. W praktyce bez odpowiednich narzędzi umożliwiających połączenie różnych systemów jest to ciężkie do realizacji z powodu ciągłej rekonfiguracji struktury połączeń i wykonywanych okresowo modernizacji.

Model opracowany został w programie OpenDSS rozpowszechnianym na licencji open source przez EPRI. Środowisko zostało zaprojektowane do przeprowadzania symulacji pracy systemu dystrybucyjnego energii elektrycznej. Działanie środowiska OpenDSS oraz problematyka symulacji pracy sieci została opisana szerzej w artykułach [1-9].

Na rysunku 2 zaprezentowano koncepcję współpracy modelu symulacyjnego z systemami informatycznymi takimi jak: system zarządzania majątkiem sieciowym (ZMS), centralna baza pomiarowa (CBP), bazy pomiarowe parametrów jakości energii elektrycznej (WinPQ, SyndisPQ) [10].



Rys. 2. Współpraca środowiska symulacyjnego z systemami ZMS, CBP, WinPQ, SyndisPQ [10]

Do budowy modelu niezbędne są dane gromadzone w systemie ZMS. W tym przypadku warto zadbać o ustandaryzowanie wymiany informacji pomiędzy systemami na przykład wykorzystując Common Grid Model Exchange Specification (CGMES). Specyfikacja jest wykorzystywana podczas wymiany danych operacyjnych

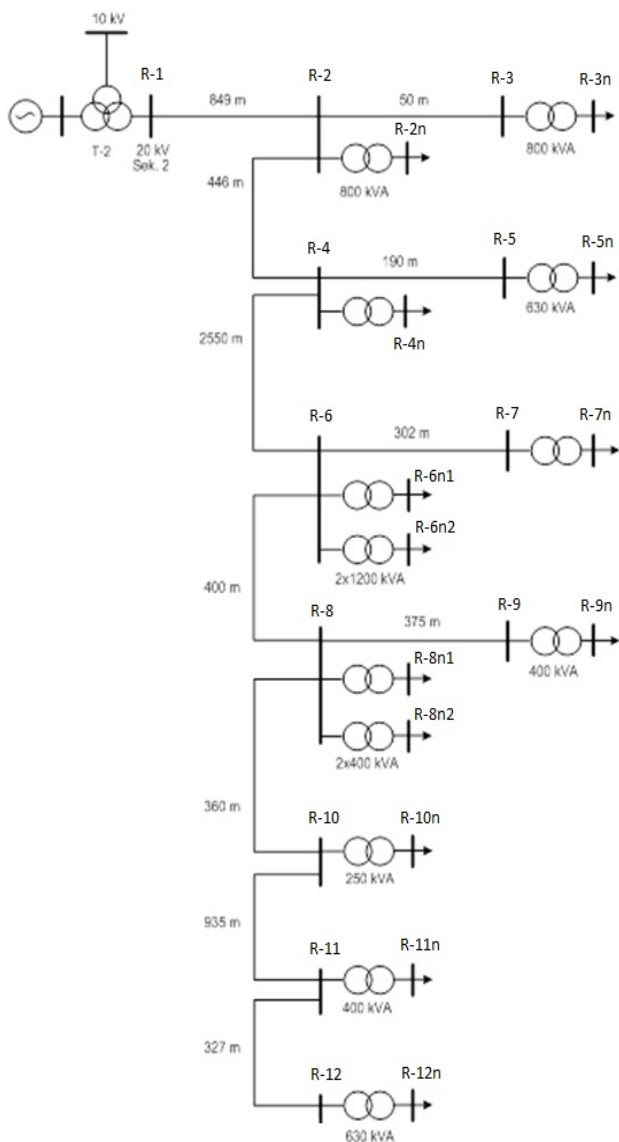
i danych dotyczących planowania sieci między operatorami systemów przesyłowych [11].

Cennym źródłem danych jest system pomiarowy gromadzący informacje z urządzeń pomiarowych pracujących w sposób ciągły lub czasowy.

Instalacja zbyt dużej liczby urządzeń pomiarowych jest ekonomicznie nieopłacalna, dlatego część danych może zostać zastąpiona informacjami statystycznie oszacowanymi np. profilami obciążenia, danymi historycznymi. Zwłaszcza, gdy odbiór charakteryzuje się okresowością w poborze energii.

Połączenie trzech powyższych elementów pozwala na przygotowanie systemu wspomagania decyzji dedykowanego zarówno dla inżynierów odpowiedzialnych za prawidłową pracę sieci, jak i kadry zarządzającej odpowiedzialnej za planowanie inwestycji.

Na rysunku 3 zamieszczono schemat badanej sieci dystrybucyjnej. W jej obszarze zainstalowanych jest 10 urządzeń pomiarowych, na które składają się 4 analizatory JEE klasy A oraz 6 liczników energii elektrycznej wyposażonych w funkcje pomiaru parametrów JEE. Informacje z tych urządzeń są podstawą do wykonania symulacji oraz weryfikacji uzyskanych wyników. Przyjęty do analizy okres pomiaru wynosił 3 tygodnie.



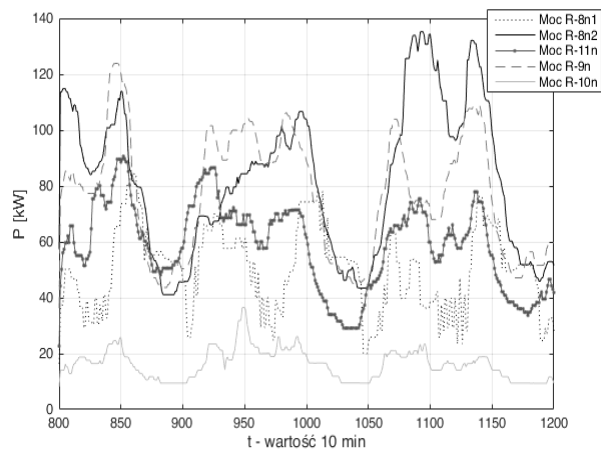
Rys. 3. Schemat rozważanej sieci dystrybucyjnej

## Weryfikacja danych symulacyjnych

Zgromadzone dane umożliwiły wykonanie porównania rzeczywistej pracy obszaru testowego sieci dystrybucyjnej z danymi wygenerowanymi przy wykorzystaniu modelu sieci dystrybucyjnej w programie OpenDSS. Analizie poddano opomiarowane węzły sieci: R-1 (początek sieci), R-9, R-8n1, R-8n2, R-11n, R-9n oraz R-10n.

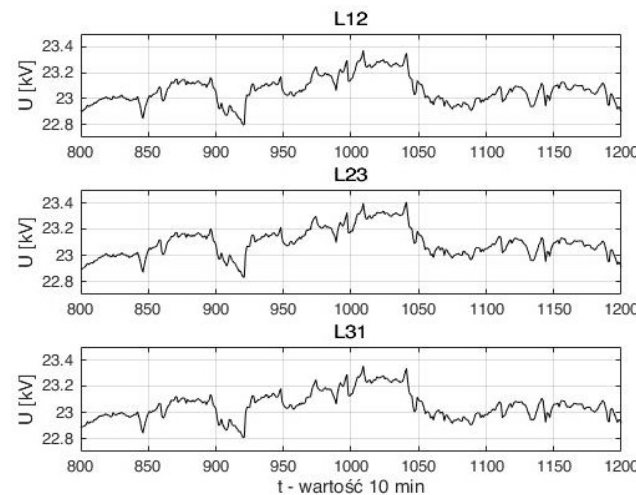
W celu wykonania symulacji zmian napięcia z interwałem 10 minutowym niezbędne jest uwzględnienie mocy węzłów końcowych oraz wartości napięcia zasilającego sieć.

Źródłem danych mogą być pomiary wykonane za pomocą liczników końcowych, bilansujących oraz analizatorów jakości energii. Przydatne mogą okazać się również profile obciążenia oszacowane dla danego typu odbiorcy. Model symulacyjny zbudowano w oparciu o rejestrację mocy czynnej wykonane przez analizatory oraz liczniki. Jej zmienność oraz wolumen zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Wartość mocy (filtr medianowy) - Faza L1

Węzeł R-1 (do którego dołączony jest badany obszar sieci dystrybucyjnej) charakteryzuje się zmiennością wartości skutecznego napięcia zaprezentowaną na rysunku 5.

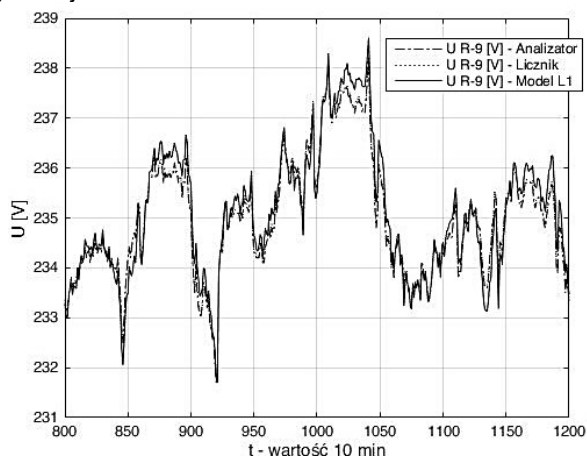


Rys. 5. Napięcie wężła R-1

Dla analizowanego okresu zmienność wartości skutecznej napięcia, wyznaczona na podstawie analizy zagregowanych wartości 10 minutowych, mieści się w zakresie 2,8% wartości średniej napięcia skutecznego.

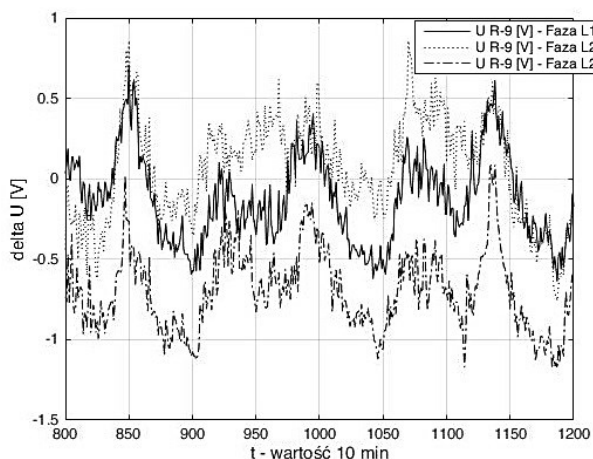
Jak wynika z przeprowadzonych testów uwzględnienie wartości napięcia wężła R-1 w symulacjach pozwala zwiększyć ich dokładność.

Na rysunkach 6 przedstawiono porównanie wartości skutecznej napięcia węzła R 9n z wartościami zmierzonymi za pomocą analizatora, licznika oraz będącymi wynikiem symulacji.



Rys. 6. Napięcie węzła R-9n – z uwzględnieniem zmienności mocy i napięcia zasilającego

Rysunek 7 przedstawia różnicę wartości skutecznej napięcia zmierzonego przy pomocy analizatora w poszczególnych fazach oraz będącego wynikiem symulacji.



Rys. 7. Napięcie węzła R-9n – z uwzględnieniem zmienności mocy i napięcia zasilającego

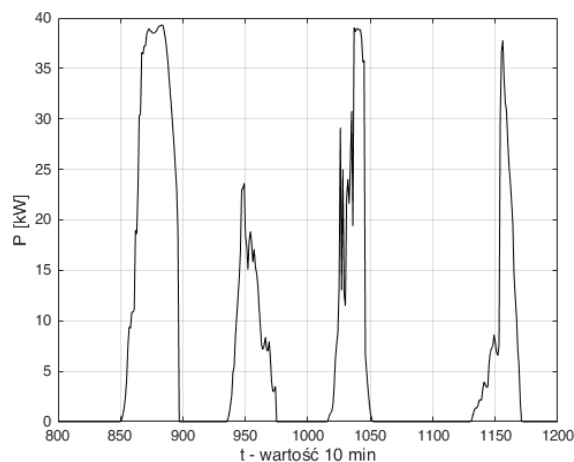
Średnia względna różnica wartości skutecznej napięcia zmierzonego (węzły R-9, R-8n1, R-8n2, R-11n, R-9n oraz R-10n) oraz symulowanego zawierała się w przedziale od 0,05% do 2,46%.

### Symulacja wpływu przyłączenia oze

Za sprawą uwarunkowań prawno-finansowych w Polsce coraz popularniejsze stają się prosumenckie oraz komercyjne instalacje fotowoltaiczne. Tego typu instalacje charakteryzują się zmiennością produkcji zależną od zmiennych warunków pogodowych. Instalowane są niejednokrotnie w miejscach znacznie oddalonych od transformatora, o niskiej mocy zwarciowej. Wpływ takich instalacji na sieć wymaga szczególnej uwagi od OSD.

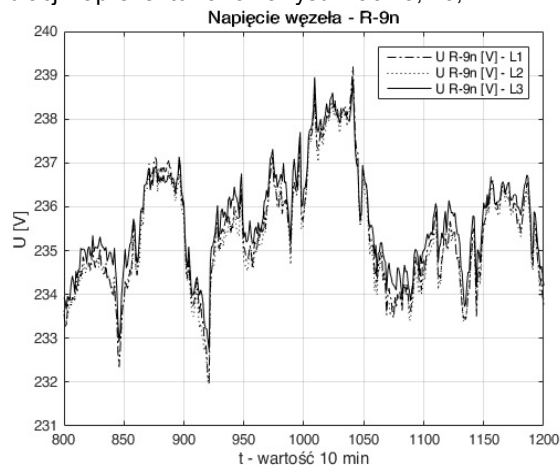
#### A. Symulacja przyłączenia 1 fazowego OZE do sieci dystrybucyjnej

Na potrzeby symulacji założono, że do węzła R-12n (fazy L1) została przyłączona elektrownia fotowoltaiczna o mocy 60 kW. Wykorzystano przykładowe zmierzone dane dla dnia słonecznego oraz dni częściowo pochmurnych. Zmienność mocy elektrowni w te dni przedstawiono na rysunku 8.

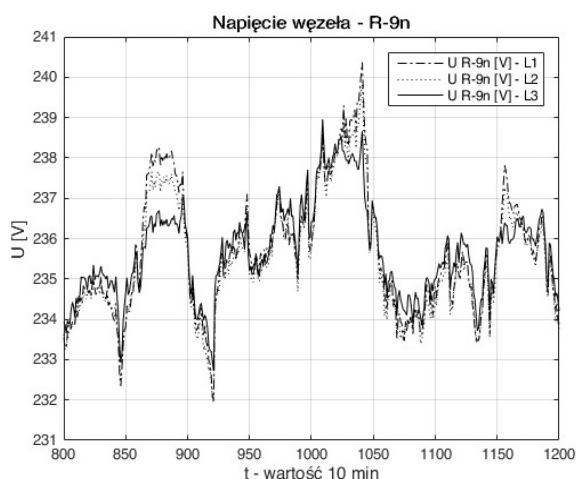


Rys. 8. Moc elektrowni fotowoltaicznej – dzień słoneczny / pochmurny

W celu stwierdzenia wpływu elektrowni na sieć przeskalanowano dane pięciokrotnie (300 kW) i dziesięciokrotnie (600 kW). Jest to sytuacja hipotetyczna, mająca na celu pokazanie wpływu rozproszonych jednofazowych instalacji PV na sieć dystrybucyjną. Wyniki symulacji zaprezentowano na rysunkach 9, 10, 11.

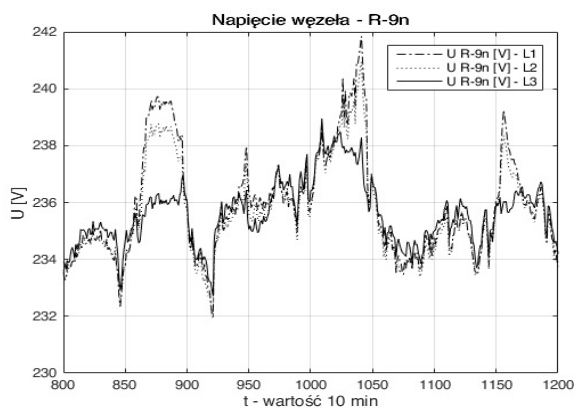


Rys. 9. Napięcie węzła R-9n – przyłączenie jednej 1 fazowej PV



Rys. 10. Napięcie węzła R-9n – przyłączenie pięciu 1 fazowych PV

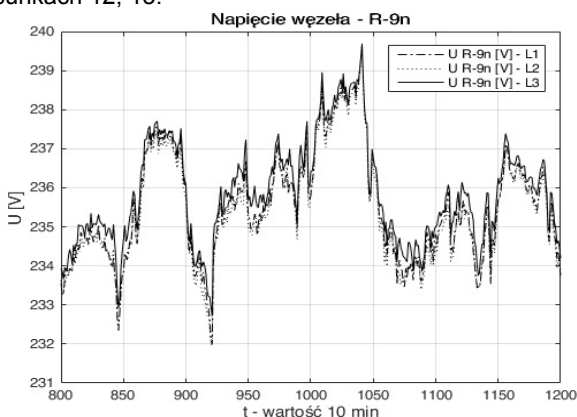
Przyłączenie kolejnych 1 fazowych elektrowni PV spowoduje zwiększenie wartości skutecznej napięcia w fazie L1 i L2 oraz jej obniżenie w fazie L3. Jednocześnie zwiększa się asymetria napięcia zasilającego.



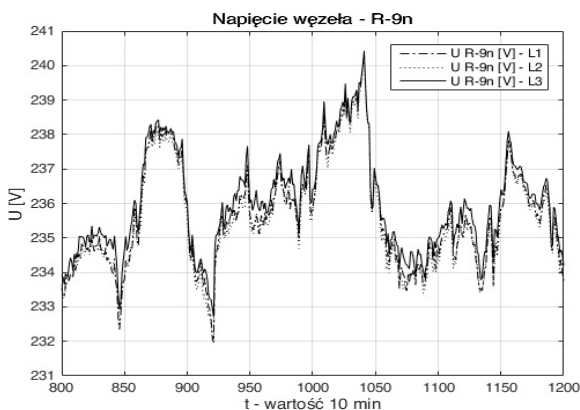
Rys. 11. Napięcie węzła R-9n – przyłączenie dziesięciu 1 fazowych PV

### B. Symulacja przyłączenia 3 fazowego OZE do sieci dystrybucyjnej

Dla rzeczywistych danych wykonano symulację przyłączenia do sieci dystrybucyjnej pięciu oraz dziesięciu 3 fazowych elektrowni PV. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 12, 13.



Rys. 12. Napięcie węzła R-9n – przyłączenie pięciu 3 fazowych PV



Rys. 13. Napięcie węzła R-9n – przyłączenie dziesięciu 3 fazowych PV

Przyłączenie instalacji 3 fazowych wewnątrz sieci dystrybucyjnej spowoduje zwiększenie wartości skutecznej napięcia fazowego (Rys. 12-13). Zjawisko to jest szczególnie niekorzystne w przypadku sieci, w której dominującym obciążeniem są odbiorcy z grupy taryfowej G. Dla nich występuje spadek obciążenia w godzinach, w których produkcja z PV jest zazwyczaj największa.

### Wnioski

Współpraca systemu pomiarowego oraz środowiska symulacyjnego pozwoliła na uzyskanie efektu synergii

upraszczając model i jednocześnie zwiększając dokładność szacowania.

Narzędzie symulacyjne współpracujące z systemem pomiarowym pozwala na szacowanie wartości skutecznej napięcia wewnątrz sieci ze średnim błędem dla całego analizowanego okresu na poziomie poniżej 1%.

W przypadku rozległych systemów, w skład których wchodzi duża liczba urządzeń pomiarowych, czasochłonne jest wykrycie błędnie mierzącego urządzenia. Porównanie wyników symulacji i rejestracji pozwala automatycznie weryfikować poprawność ich działania.

Wykorzystanie środowiska symulacyjnego umożliwia oszacowanie wpływu elektrowni fotowoltaicznych na sieć dystrybucyjną z uwzględnieniem niesymetrii źródła.

**Autorzy:** dr inż. Krzysztof Piątek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: [kpiatek@agh.edu.pl](mailto:kpiatek@agh.edu.pl); dr inż. Tomasz Siostrzonek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: [tsios@agh.edu.pl](mailto:tsios@agh.edu.pl); dr inż. Szymon Barcentewicz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: [barcent@agh.edu.pl](mailto:barcent@agh.edu.pl); dr inż. Bogusław Świątek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: [boswiate@agh.edu.pl](mailto:boswiate@agh.edu.pl); mgr inż. Mateusz Dutka, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: [mdutka@agh.edu.pl](mailto:mdutka@agh.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Mortazavi H., Mehrjerdi H., Saad M., Lefebvre S., Asber D., Lenoir L.: An Impedance-Based Method for Distribution System Monitoring, IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, Volume: 9, Issue: 1, 220-229
- [2] Abdelsamad S. F., Morsi W. G., Sidhu T. S.: Impact of Wind-Based Distributed Generation on Electric Energy in Distribution Systems Embedded With Electric Vehicles, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, Volume: 6, Issue: 1, 79-87
- [3] Liang Ch., Jun H., Yiran W., Jian T., Hong L., Sanrong G., Yin W.: Analysis of Access Location and Capacity of Distributed Generation Based on OpenDSS, 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), IEEE Xplore, 2018
- [4] Mahmoud K., Abdel-Nasser M.: Efficient SPF approach based on regression and correction models for active distribution systems, IET Renewable Power Generation, 2017, Volume: 11, Issue: 14, 1778-1784
- [5] Argüello A., Cunha W. L., Ricciardi T. R., Torquato R., Freitas W.: Dynamic Modeling in OpenDSS: An Implementation Sequence for Object Pascal, 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Aug. 2018.
- [6] Rangel C. A. S., Canha L., Sperandio M., Severiano R.: Methodology for ESS-type selection and optimal energy management in distribution system with DG considering reverse flow limitations and cost penalties, IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, Volume: 12, Issue: 5, 1164-1170
- [7] Maciel R., Campello T., Silva M., Borba B., Fritz L., Ferreira V., Zamboti M., Correia W.: DG impact evaluation on LV distribution grids using AMI data: a Brazilian case study, CIRED - Open Access Proceedings Journal, 2017, Issue: 1, 1699-1702
- [8] Mahmoud K., Yorino N.: Robust quadratic-based BFS power flow method for multi-phase distribution systems, IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, Volume: 10, Issue: 9, 2240-2250
- [9] Pecenek Z. K., Disfani V. R., Reno M. J., Kleissl J.: Multiphase Distribution Feeder Reduction, IEEE Transactions on Power Systems, 2018, Volume: 33, Issue: 2, 1320-1328
- [10] Dutka M., Piątek K., Siostrzonek T., Barcentewicz Sz., Świątek B., Estymacja wartości skutecznej napięcia w nieopomiarowanych punktach sieci elektroenergetycznej z wykorzystaniem środowiska symulacyjnego, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2018, numer 67, 73-77
- [11] Gietz M., Rogowski T.: CGMES as an Interface for Multilateral Grid Modelling Data Exchange, International Conference Modern Electric Power Systems, Wrzesień 2019