

Wrocław 12 lipca 2021 r.

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Rosołowski  
Katedra Energoelektryki  
Wydział Elektryczny  
Politechnika Wrocławska

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Augustyna Wójcika

pt. *"Zastosowanie metod czasowo-częstotliwościowych do analizy stanów nieustalonych odbiorników energii elektrycznej"*

### 1. Dane ogólne

Recenzowana praca powstała na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Piotra Bilskiego. Promotorem pomocniczym był dr hab. inż. Ryszard Kowalik. Tekst pracy został zawarty na 210 stronach łącznie z wykazem literatury i załącznikiem. Praca została wydana w zwartej formie w postaci publikacji książkowej. Niniejsza recenzja pracy została sporządzona na wniosek Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.

### 2. Charakterystyka tematu rozprawy

Przedmiotem zainteresowań Autora recenzowanej pracy jest wykorzystanie nowoczesnych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów i podejmowania decyzji w celu identyfikacji rodzaju odbiorników energii elektrycznej przyłączanych do nadzorowanej sieci zasilającej. W zamyśle Autora pracy, zadanie to może służyć do skutecznego zarządzania i monitorowania zużycia energii elektrycznej. Zgodnie z tytułem pracy, podstawowy cel badawczy jest związany z rozwojem metod analitycznych prowadzących do identyfikacji rodzaju załączanych do sieci odbiorów na podstawie szczegółowej analizy towarzyszących temu zdarzeniu elektromagnetycznych stanów przejściowych objawiających się w postaci występujących charakterystycznych przebiegów prądu i napięcia. Zakłada się przy tym, że załączane odbiorniki mają parametry dostosowane do znamionowych warunków pracy rozpatrywanej sieci. Obserwowane przy tym zaburzenie ma więc także charakter znamionowy, co z pewnością utrudnia realizację postawionego zadania. Poszukiwanie stosownych metod identyfikacji i klasyfikacji takich zdarzeń jest zatem dużym wyzwaniem badawczo-

eksperymentalnym. Należy podkreślić, że analiza stanu sieci elektroenergetycznych na podstawie szczegółowych charakterystyk związanych ze standardowymi przełączeniami dostarcza informacji zarówno co do charakteru załączanych odbiorników, ale także pozwala ocenić stan samej sieci, co składa się na szeroko rozumianą diagnostykę sieci zasilającej i znakomicie rozszerza potencjalne zastosowanie rezultatów prowadzonych w pracy badań.

Oceniając rozwijany w pracy aparat badawczy należy zauważyć, że poprawna identyfikacja i klasyfikacja rozpatrywanych zdarzeń odbywa się w warunkach słabego odróżnienia sygnałów użytecznych od naturalnego szumu tła, związanego z pracą sieci elektroenergetycznych. Wymaga to zastosowania bardzo czułych i selektywnych algorytmów identyfikacji obserwowanych sygnałów. Autor stosuje w tym celu nowoczesne metody przetwarzania sygnałów i klasyfikacji zdarzeń, które są głównie stosowane w warunkach nieinwazyjnego monitorowania. Koncepcja ta jest rozwijana w ostatnich latach w celu zarówno monitorowania zużycia energii elektrycznej, jak również wspomnianej diagnostyki sieci.

Recenzowana rozprawa dotyczy zatem aktualnych zagadnień związanych z racjonalnym zużyciem energii elektrycznej, niezawodnością zasilania odbiorców oraz jakością energii elektrycznej. Zaproponowane narzędzia odnoszące się do analizy sygnałów w pełni odzwierciedlają nowoczesne tendencje w tym zakresie. Podjęty temat, zarówno z użytkowego, jak i teoretycznego punktu widzenia jest, bez wątpienia, zagadnieniem naukowym odpowiednim na rozprawę doktorską. Teoretyczne udowodnienie postawionej w pracy tezy oraz jej praktyczna weryfikacja jest ważnym osiągnięciem w zakresie dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika, a w szczególności w zakresie identyfikacji charakterystyk związanych ze stanami przejściowymi w sieci elektrycznej i klasyfikacji związanych z tym zdarzeń.

### **3. Charakterystyka rozwiązania postawionego problemu i użytych metod**

Recenzowana praca jest podzielona na 7 rozdziałów; zawiera ponadto wykaz literatury oraz załącznik, w którym bardziej szczegółowo opisane są algorytmy pomiarowe związane z grupą metod odnoszących się do średniej częstotliwości próbkowania (metody MF).

We wstępnej części przedstawione są różne metody nieinwazyjnych sposobów identyfikacji zdarzeń związanych z załączeniem odbiorników do sieci. Doktorant wydzielił cztery grupy tych metod, których podstawowym wyróżnikiem jest stosowana częstotliwość próbkowania mierzonych sygnałów prądu i napięcia. Stosownie do tego, mogą być dobrane odpowiednie metody przetwarzania sygnałów, które prowadzą do wyznaczenia pośrednich wielkości pomiarowych, na podstawie których określone są tzw. sygnatury utworzone ze zbiorów charakterystycznych cech służących do selekcji poszczególnych rodzajów identyfikowanych w sieci obiektów. Kolejnym etapem w

założonym algorytmie przetwarzania zgromadzonej podczas pomiaru informacji jest klasyfikacja parametrów zdefiniowanych sygnatur, która kończy się ostateczną decyzją co do charakteru obserwowanego zdarzenia. Każdy z tych szczegółowych etapów algorytmu jest analizowany pod kątem możliwości jego wykorzystania do rozwiązania omawianego problemu, co jest uzasadniane odpowiednimi danymi literaturowymi. Po prezentacji tego rdzenia rozważanego algorytmu (celu pracy), Doktorant formułuje tezę oraz podstawowe cele pracy badawczej, ujęte w postaci zadań, które zmierzają do jej udowodnienia.

W kolejnych rozdziałach Autor szczegółowo analizuje różne algorytmy przetwarzania sygnałów oraz klasyfikacji parametrów sygnatur, posiłkując się ilustracjami w postaci eksperymentalnych badań laboratoryjnych. Tej analizie i ocenie poddane zostały cztery grupy metod pomiarowych i związanych z nimi rodzin algorytmów klasyfikacji. Metody pomiarowe są zdefiniowane przez zakres stosowanych częstotliwości próbkowania, poczynając od metody transformacji Fouriera i estymację podstawowych parametrów sygnałów elektrycznych, jak wartość skuteczna, czy konduktancja dla średniego zakresu częstotliwości próbkowania (metoda MF). Dla większego zakresu częstotliwości próbkowania (do 10 MHz, metoda HF-CVT), Autor rozważa stosowanie algorytmów przetwarzania sygnałów na bazie ciągłej i dyskretnej transformaty falkowej. Przeprowadzona jest szczegółowa analiza związana z wyborem falki bazowej oraz macierzy współczynników falkowych, na podstawie których definiowane są parametry odpowiednich sygnatur, które w kolejnym kroku algorytmu służą do selekcji obiektu.

Kolejna grupa metod odwołuje się do przetwarzania sygnałów na bazie korelacji wzajemnej (częstotliwość próbkowania powyżej 10 MHz, metoda HF-COR). Wstępnie są tutaj definiowane fragmenty charakterystycznych przebiegów, tworzące tzw. słownik stanów nieustalonych, które są bazą do algorytmów autokorelacji. Współczynniki korelacji są następnie wykorzystywane do klasyfikacji obserwowanych i zarejestrowanych zdarzeń.

Ostatnia z prezentowanych i analizowanych metod polega na generacji w sieci impulsowych sygnałów testujących i ich pomiar. W odróżnieniu od poprzednich, ta metoda ma charakter procedury czynnej: źródłem stanów nieustalonych jest zewnętrzny generator sygnałów impulsowych, dołączony do badanego obszaru sieci elektrycznej. Kryterium selekcji jest w tym przypadku określone na podstawie charakterystycznych cech narastającego i opadającego zbocza obserwowanych impulsów. Istotnym elementem badanych algorytmów był etap klasyfikacji obserwowanych zdarzeń. Autor szczegółowo badał trzy rodziny klasyfikatorów: drzewo decyzyjne, sieć neuronową oraz algorytm  $k$ -najbliższych sąsiadów.

Zasadnicze osiągnięcia Autora, które uzasadniają postawioną tezę, zawarte są w rozdziałach 3, 4, 5, i 6. Przedstawione są w nich algorytmy przetwarzania sygnałów, tworzenia zbioru sygnatur służących do klasyfikacji rodzaju obiektów załączanych do sieci, ich weryfikacji i oceny. Przeprowadzone badania są ilustrowane pomiarami przeprowadzonymi na fizycznych obiektach laboratoryjnej instalacji testowej, co w pełni uzasadnia i potwierdza uzyskane wyniki i sformułowane wnioski końcowe pracy.

Doktorant ilustruje proponowaną metodę identyfikacji rodzaju obciążenia w sieci elektrycznej na przykładzie sieci komunalnej niskiego napięcia (nn). Metoda ma jednak walory uniwersalne i bez trudu można ją zastosować do sieci przemysłowej lub sieci rozdzielczej średniego napięcia, gdzie mogłaby służyć do detekcji miejsca uszkodzenia w rozgałęzionej sieci lub ocenę wskaźników jakości dostarczanej energii elektrycznej.

Tekst rozprawy pokazuje, że Autor w sposób metodyczny uzasadnia postawioną tezę, dostarczając jednocześnie wskazówek dla projektantów podobnych systemów diagnostyczno-klasyfikacyjnych.

#### **4. Wartość merytoryczna rozprawy**

Wartość merytoryczna pracy nie budzi wątpliwości, a jej zalety polegają na oryginalnym sformułowaniu poznawczego zagadnienia związanego z analizą zjawisk dynamicznych towarzyszących załączaniu odbiorników energii w sieciach elektroenergetycznych.

Do głównych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- Opracowanie oryginalnych metod analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych w sieciach elektrycznych na podstawie zarejestrowanych cyfrowo przebiegów prądu i napięcia, które pozwalają dokonać klasyfikacji rodzaju obiektu załączonego do sieci.
- Opracowanie sposobu definiowania parametrów sygnatur charakterystycznych dla poszczególnych rodzajów odbiorników, które stanowią swego rodzaju 'odciski palców', pozwalające na selektywną identyfikację poszczególnych rodzajów odbiorników łączonych do sieci.
- Wykazanie na podstawie przeprowadzonych fizycznych testów laboratoryjnych, że zbiór parametrów zdefiniowanych sygnatur stanowi praktyczne źródło charakterystyk, które mogą służyć do selekcji obserwowanych zdarzeń w postaci załączanych odbiorników.
- Praktyczne wykazanie, że selektywność proponowanej metody identyfikacji zależy od częstotliwości próbkowania rejestrowanych przebiegów prądu i napięcia oraz od zastosowanej metody cyfrowego przetwarzania zarejestrowanych sygnałów. Przeprowadzone badania dają wskazówki co do sposobu wyboru obu tych parametrów.

- Opracowanie metod praktycznej klasyfikacji i podejmowania decyzji odnoszącej się do wyboru wskazującego na właściwy obiekt przyłączany do sieci. Przytoczona analiza rezultatów fizycznych testów daje także wskazówki co do weryfikacji poszczególnych algorytmów.

Praca dotyczy bardzo wyspecjalizowanego zagadnienia związanego z analizą stanów przejściowych w sieci elektrycznej oraz identyfikacji i klasyfikacji zdarzeń związanych z tymi przebiegami. Poszczególne metody przetwarzania sygnałów oraz klasyfikacji zbiorów wyznaczonych przez parametry zdefiniowanych sygnatur są ogólnie znane. Osiągnięcia Autora dysertacji należy formułować w odniesieniu do postawienia samego zadania badawczego, utworzenia metod prowadzących do udowodnienia postawionej tezy oraz praktycznej weryfikacji proponowanych algorytmów.

### **5. Ogólne uwagi dyskusyjne**

Uznając oryginalność postawionej tezy i poprawność jej wykazania można jednak pod adresem jej Autora sformułować następujące zastrzeżenia i pytania natury bardziej ogólnej.

1. Główny kierunek badań jest skierowany w pracy na doskonalenie metod rozpoznawania wzorców związanych z obecnością w sieci określonych typów odbiorników energii elektrycznej. We wstępnej części pracy autor wskazuje, że pozyskanie tej wiedzy może służyć bardziej racjonalnemu wykorzystaniu energii elektrycznej. Czy doktorant mógłby rozwinąć i uzasadnić ten praktyczny aspekt wykorzystania rezultatów prowadzonych badań?
2. Autor ilustruje proponowane metody identyfikacji i klasyfikacji wzorców na przykładzie zdarzeń odnoszących się do elektrycznej sieci komunalnej. Zadziwia dosyć duża skuteczność rozpatrywanych metod w sytuacji, gdy źródła zasilania są elektrycznie znacznie oddalone od obszaru prowadzonych badań, przez co pomiary mogą być zakłócone. Jednym z zakłóceń, które doktorant rozpatruje jest obecność w badanym obszarze także innych odbiorów. W opisanych warunkach można się także liczyć z dosyć dużym wpływem na wyniki pomiaru innych odbiorów w badanej sieci, przyłączonych poza mierzonym obszarem. Czy takie badania były prowadzone?
3. Rozpatrywane w pracy metody badania dynamicznych charakterystyk towarzyszących załączaniu odbiorów energii elektrycznej są w dużej mierze zbieżne z nowoczesnymi metodami pomiaru wskaźników jakości energii elektrycznej. Czy doktorant rozpatrywał możliwość takiego właśnie rozszerzenia zastosowania proponowanych algorytmów odnoszących się do warstwy przetwarzania sygnałów w realizowanej pracy?
4. We współczesnych sieciach elektroenergetycznych coraz większą rolę odgrywają tzw. niekonwencjonalne źródła zasilania, które charakteryzują się obecnością przekształtników energoelektronicznych. W sposób nieuchronny są one źródłem zakłóceń o szerokim zakresie

częstotliwości. Czy na podstawie przeprowadzonych w pracy badań można wskazać sposób redukcji wpływu takich zakłóceń na wyniki prowadzonej klasyfikacji zdarzeń?

#### **6. Uwagi szczegółowe i redakcyjne**

Praca jest starannie zredagowana, zawiera wiele ilustracji prezentujących zależności pomiędzy analizowanymi parametrami. Nieliczne nieścisłości lub błędy są nieuchronne w tego typu pracach i w tym przypadku nie wpływają na jej pozytywną ocenę.

#### **7. Wnioski końcowe**

Po zapoznaniu się z recenzowaną pracą, z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że spełnia ona z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz.U. z dnia 21.06.2016r., poz. 882) w odniesieniu do dyscypliny *elektrotechnika* i wypełnia odnośne wymagania zawarte w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w odniesieniu do dyscypliny *automatyka, elektronika i elektrotechnika*. (Dz. U. z dnia 30.01.2018 r., poz. 261). Wnioskuje zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

