

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY  
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na

**PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr. inż. Augustyna WÓJCIKA,**

która odbędzie się w dniu 31 sierpnia 2021 roku o godzinie 10:00,

w trybie zdalnym na platformie MS Teams\*.

Temat rozprawy doktorskiej:

***„Zastosowanie metod czasowo-częstotliwościowych do analizy stanów nieustalonych odbiorników energii elektrycznej”***

Promotor: dr hab. inż. Piotr Bilski, prof. uczelni – Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Wiesław Miczulski – Uniwersytet Zielonogórski

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Rosołowski – Politechnika Wrocławska

\*Obrona odbędzie się zdalnie na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: [jweremcz@elka.pw.edu.pl](mailto:jweremcz@elka.pw.edu.pl), w dniu obrony do godz. 9:00.

Transmisja będzie również dostępna poprzez kanał YouTube: <https://youtu.be/B2dWReH1eKY> (łącznie zapasowe, do użycia w warunkach awaryjnych: <https://youtu.be/awC3kKcFpt8>).

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej:

[www.elka.pw.edu.pl/Badania-i-nauka/Postepowania-w-sprawach-stopni-naukowych-i-tytułu-naukowego/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenie-i-recenzje](http://www.elka.pw.edu.pl/Badania-i-nauka/Postepowania-w-sprawach-stopni-naukowych-i-tytułu-naukowego/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenie-i-recenzje)

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika  
Politechniki Warszawskiej

prof. dr hab. inż. Tomasz Starecki

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH

# Rozprawa doktorska

## *streszczenie*

mgr inż. Augustyn Wójcik

Zastosowanie metod czasowo-częstotliwościowych do analizy stanów nieustalonych odbiorników energii elektrycznej

Promotor

dr hab. inż. Piotr Bilski, prof. PW

Promotor pomocniczy

dr hab. inż. Ryszard Kowalik, prof. PW

WARSZAWA 2021

## STRESZCZENIE

Rosnące zużycie energii elektrycznej rodzi zapotrzebowanie na metody skutecznego zarządzania nią. Przedmiotem badań w tym zakresie są nieinwazyjne systemy monitorowania zużycia energii elektrycznej przez poszczególne odbiorniki na podstawie dokładnych pomiarów sygnałów w sieci zasilającej, w jednym punkcie monitorowanego obszaru. Badania przedstawione w rozprawie dotyczą nowych metod analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów prądu i napięcia w stanach niestabilnych odbiorników energii elektrycznej. Opracowane metody wykorzystują dane pomiarowe uzyskane w wyniku zastosowania różnych, unikalnych metod pomiaru. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych na odbiornikach energii elektrycznej w rzeczywistych warunkach pracy pokazują, że zastosowanie odpowiednich metod pomiaru i analizy sygnałów umożliwia identyfikację typu odbiornika na podstawie stanu niestabilnego występującego w momencie jego włączenia.

**Słowa kluczowe:** stany niestabilne, nieinwazyjne monitorowanie zużycia energii elektrycznej, sygnały impulsowe, analiza czasowo-częstotliwościowa, sygnatury urządzeń elektrycznych

## ABSTRACT

Growing electricity consumption yields demand for its effective management methods. The subject of research in this area is the Non-Intrusive Load Monitoring system. Such a system would measure the energy consumption of individual appliances on the basis of accurate measurements of electrical network signals in a single point of the monitored area. Results presented in the thesis, concern new methods for time-frequency analysis of the current and voltage signals in transient states of electricity receivers. The developed methods use measurement data obtained by applying various, unique measurement methods. The results of experiments carried out on electricity receivers under real-world operating conditions indicate that the use of adjusted methods for signal measurement and analysis enables identification of the electricity receiver type on the basis of the transient state occurring at the moment of its switching on.

**Keywords:** transient state, Non-Intrusive Load Monitoring, impulse signals, time-frequency analysis, appliance signatures

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.



**Dr hab. inż. Wiesław Miczulski, profesor uczelni**  
**Uniwersytet Zielonogórski**  
**Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki**  
**Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki**  
**65-417 Zielona Góra**  
**ul. Licealna 9**  
w.miczulski@imei.uz.zgora.pl

Zielona Góra, 2021-07-24

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr. inż. Augustyna Wójcika**

Tytuł rozprawy:

**„Zastosowanie metod czasowo-częstotliwościowych do analizy stanów  
nieustalonych odbiorników energii elektrycznej”**

#### **1. Podstawa formalna recenzji**

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Augustyna Wójcika, wykonanej na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej pod opieką promotora dra hab. inż. Piotra Bilskiego, profesora uczelni i promotora pomocniczego dra hab. inż. Ryszarda Kowalika, profesora uczelni jest pismo Pana prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, z dnia 14 czerwca 2021 r.

Recenzja została opracowana na podstawie przedłożonego tekstu rozprawy.

#### **2. Ocena doboru tematu i zakresu rozważań**

Rezolucja Parlamentu Europejskiego zobowiązuje państwa członkowskie Unii Europejskiej do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Zobowiązania te są m. in. realizowane poprzez ograniczenie emisji dwutlenku węgla przez krajowe systemy elektroenergetyczne (KSE). Konsekwencją tego jest wprowadzanie w wielu krajach niskoemisyjnych odnawialnych źródeł energii (OZE). Zmienność wytwarzanej mocy przez OZE, a także konieczność okresowych remontów elektrowni konwencjonalnych oraz występowanie dużego zapotrzebowania na moc w określonych godzinach szczytu i porach roku mogą spowodować trudności zarządzania mocą w KSE. Zatem istotnym problemem staje się zapewnienie elastyczności i bezpieczeństwa KSE, które może być zrealizowane poprzez zastosowanie odpowiednich działań polegających na identyfikowaniu, ocenie i wykorzystaniu zasobów po stronie popytu na energię elektryczną przez jej konsumentów końcowych. Konsumenty energii mogą przyczynić się do skutecznego zapewnienia elastyczności i bezpieczeństwa KSE oraz dodatkowo zaoszczędzić pieniądze. W literaturze są proponowane rozwiązania programowo-sprzętowe, które pozwalają w określonych porach dnia i roku zarządzać u odbiorców końcowych zużyciem energii przy jednoczesnym zapewnieniu im komfortu korzystania z odbiorników energii elektrycznej (OEE).

Takie działania wymagają opracowania metod identyfikacji, czy dany OEE jest włączony i ile zużywa energii elektrycznej.

Na dzień dzisiejszy w tym zakresie są stosowane rozwiązania inwazyjnego monitorowania zużycia energii elektrycznej dla każdego OEE, umożliwiając jego włączenie lub wyłączenie oraz pomiar aktualnie pobieranej mocy. Dane pomiarowe i sygnały sterujące są przesyłane, najczęściej z zastosowaniem komunikacji bezprzewodowej, do systemu zarządzania zużyciem energii u odbiorcy końcowego. Powoduje to rozbudowę takiego systemu. Z literatury wynika, że od wielu lat prowadzone są również w wielu ośrodkach naukowych badania nad systemami nieinwazyjnego monitorowania zużycia energii elektrycznej (ang. Non-Intrusive Load Monitoring – NILM). Na dzień dzisiejszy nie przyniosły one spodziewanych efektów. Pozytywne wyniki tych prac umożliwią w przyszłości umieszczenie takiego systemu w jednym punkcie monitorowanego obszaru, np. w inteligentnym liczniku energii elektrycznej, który będzie określał stan pracy OEE, wyznaczał ilość zużytej energii przez dany odbiornik, a także nimi sterował.

W rozdziale 1 rozprawy doktorskiej Doktorant scharakteryzował, na podstawie szerokiego przeglądu literatury, obecny stan prac naukowych nad systemami NILM. Zaprezentował ogólną strukturę systemu NILM oraz ich podział wg dwóch kategorii: zakresu częstotliwości analizowanych sygnałów (metody Low Frequency - LF, Medium Frequency - MF, High Frequency - HF i Extra-High Frequency - EHF) oraz zastosowanego podczas analizy okna czasowego (metody bazujące na sygnałach zarejestrowanych w stanach ustalonych i nieustalonych). W rozdziale tym, na podstawie analizy publikacji, zostały porównane metody LF i MF bazujące na sygnałach zarejestrowanych w stanie ustalonym. Wyniki badań wskazują, że skuteczność systemów NILM nie jest wystarczająco dobra. Doktorant na podstawie literatury dotyczącej stanów nieustalonych w obwodach elektrycznych zdefiniował jakie informacje mogą być zawarte w zarejestrowanych sygnałach. Określił również najbardziej popularne metody analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów w stanach nieustalonych. Przedstawił także siedem wybranych algorytmów, które są stosowane w systemach NILM w zakresie klasyfikacji. Założył również, że dane uczące i testujące dla zastosowanych klasyfikatorów będą przygotowane w oparciu K-krotną walidację krzyżową.

W rozdziale 2 rozprawy, dotyczącym sformułowania problemu badawczego, Doktorant na podstawie dokonanych analiz w rozdziale 1 oraz cytowanej literatury wskazał potrzebę prowadzenia dalszych badań nad systemami NILM przy zastosowaniu analizy stanów nieustalonych z jednoczesnym zastosowaniem nowych metod wyznaczania sygnatur w celu jednoznacznego określenia wszystkich typów OEE. Następnie omówił dwa tryby pracy systemu NILM: tryb uczenia i tryb testowania. Na podstawie tych działań zdefiniował założenia i ograniczenia zakresu badań. Doktorant założył, że zakres badań zaprezentowany w rozprawie będzie dotyczył części systemu NILM, czyli opracowania układów pomiarowych i sposobu rejestracji stanów nieustalonych sygnałów prądu i napięcia, metody wyznaczania sygnatur oraz opracowania wybranych klasyfikatorów i oceny jakości klasyfikacji. Zakres ten został ograniczony do możliwości przeprowadzenia identyfikacji OEE, które zmieniły stan. W rozprawie założono, że skuteczność przeprowadzonej identyfikacji zostanie uznana za właściwą, jeżeli błąd identyfikacji określony na przyjętym zbiorze testowym będzie  $\leq 10\%$ . Doktorant uzasadnił również ograniczenie metod analizy do metod MF i HF.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy badań zmierzających w kierunku poprawy skuteczności identyfikacji stanów OEE przez systemy NILM. Prawidłowa identyfikacja stanów włączenia i wyłączenia OEE jest szczególnie ważna dla algorytmów związanych z zarządzaniem zużycia energii przez odbiorców końcowych. Zatem tematyka podjętych badań jest dobrana i określona poprawnie i dotyczy aktualnych zagadnień naukowych o ważnych zastosowaniach technicznych.

### 3. Teza i cel rozprawy

Doktorant na str. 47 zdefiniował następującą tezę: „Istnieje możliwość identyfikacji stanów odbiorników energii elektrycznej na podstawie analizy stanów nieustalonych obserwowanych w sygnałach prądu i napięcia sieci elektrycznej” oraz cel badań: „Opracowanie nowych metod analizy stanów nieustalonych w momencie włączenia urządzenia”.

Teza nie została sformułowana precyzyjnie. Natomiast cel pracy jest określony poprawnie i stanowi doprecyzowanie tezy poprzez wskazanie momentu włączenia odbiornika. Teza wraz z celem rozprawy posiada cechy oryginalności.

### 4. Wykazanie poprawności tezy i realizacji celu badań

Zaproponowana przez Doktoranta koncepcja systemu NILM jest oparta na procesie pozyskiwania wiedzy (identyfikacji stanu włączenia OEE) z danych otrzymanych na podstawie przeprowadzonego eksperymentu. Istotną częścią procesu pozyskiwania wiedzy jest zgłębianie danych (ang. Data Mining), czyli wykrywanie znaczących prawidłowości i relacji poprzez zautomatyzowaną analizę i klasyfikację odpowiednio przygotowanych danych historycznych. Jakość pozyskanej wiedzy w bardzo dużym stopniu zależy od jakości przygotowanych danych.

Udowodnienie tezy oraz realizację celu badań Doktorant przedstawił w 4 kolejnych rozdziałach. Każdy z tych rozdziałów rozpoczyna się opisem metody zaproponowanej przez Doktoranta, przeznaczonej do analizy stanów nieustalonych sygnałów prądu i/lub napięcia w momencie włączenia OEE. Opisy te dotyczą następujących metod: metody MF, metody HF-CWT z zastosowaną ciągłą transformatą falkową, metody HF-COR bazującej na korelacji wzajemnej oraz metody HF-GEN z generacją sygnału impulsowego. Badania eksperymentalne dla zaproponowanych czterech metod analizy stanów nieustalonych Doktorant przeprowadził dla tych samych piętnastu pojedynczo włączanych OEE, różniących się typem i mocami znamionowymi.

Dane otrzymane z badań eksperymentalnych dla każdej z 4 metod były poddane przez Doktoranta odpowiednim procesom ich przygotowania, polegającym na wyznaczeniu ściśle określonych sygnatur. Opracowane sygnatury były podstawą identyfikacji stanu włączenia OEE. W metodzie MF sygnatura zawiera 60 wyznaczonych cech, w metodzie HF-CWT 40 cech, w metodzie HF-COR 150 cech i w metodzie HF-GEN 160 cech. Ten zakres wykonanych badań stanowił pierwszy bardzo ważny fragment prac badawczych przeprowadzonych przez Doktoranta, gdyż jakość przygotowanych sygnatur w bardzo dużym stopniu decyduje o jakości pozyskanej wiedzy z klasyfikatora. Doktorant w rozdziale 3.4 wskazuje na konieczność spełnienia dwóch warunków, które definiują właściwy dobór parametrów sygnatur. Dla każdej z zaproponowanych metod zostały przedstawione w rozprawie wykresy skrzynkowe charakteryzujące rozrzut wartości dla wybranych cech, dla wszystkich analizowanych odbiorników (kategorii). Najbardziej jest pożądana taka sytuacja, aby dla różnych OEE cechy miały różne wartości. Z przedstawionych wyników badań wynika, że nie zawsze to było możliwe do spełnienia.

Drugim ważnym fragmentem prac badawczych była analiza jakości wybranych klasyfikatorów identyfikujących stan pracy pojedynczego OEE. W każdym rozdziale dla przyjętej metody analizy danych pomiarowych Doktorant prowadził równoległe badania w oparciu o trzy typy klasyfikatorów:

- drzewo decyzyjne z zastosowanym algorytmem CART,
- sieć neuronowa z jedną ukrytą warstwą neuronów,
- algorytm k-najbliższych sąsiadów.

Klasyfikatory te w pierwszym etapie były poddane procesowi uczenia, a w drugim etapie procesowi testowania. Sygnatury uczące i testujące dla zastosowanych klasyfikatorów były przygotowane przez Doktoranta w oparciu o 10-krotną walidację krzyżową. Otrzymane

w procesie testowania estymaty kategorii stanów nieustalonych odpowiadające poszczególnym typom OEE ze wszystkich przeprowadzonych porób były porównywane z kategoriami prawdziwymi stanów nieustalonych przypisanymi tym odbiornikom. W ten sposób Doktorant otrzymywał macierz błędów klasyfikacji. Na jej podstawie, dla każdej z czterech metod analizy danych pomiarowych, wyznaczył całkowitą skuteczność klasyfikacji dla każdego wybranego klasyfikatora. Z przeprowadzonych badań wynika, że Doktorant najlepszą jakość identyfikacji stanu włączenia pojedynczego OEE otrzymał dla metody HF-COR. Dla klasyfikatora zbudowanego w oparciu o algorytm k-najbliższych sąsiadów całkowita skuteczność klasyfikacji wynosi 97,7%, dla sieci neuronowych 97,5%, a dla drzewa decyzyjnego 95,5%. Natomiast 100% dokładność klasyfikacji dla każdego z analizowanych klasyfikatorów osiągnięto odpowiednio dla 5, 4 i 4 OEE. Najniższa osiągnięta wartość dokładności klasyfikacji dla metody HF-COR wynosiła odpowiednio 92%, 92% i 84%.

Otrzymane wyniki całkowitej skuteczności klasyfikacji, wykonanej na bazie algorytmu k-najbliższych sąsiadów i sieci neuronowej, przekraczają założoną wartość 90% dla opracowanej metody HF-COR. Fakt ten potwierdza udowodnienie tezy i zrealizowanie celu prowadzonych badań. Zawarte w podsumowaniu wnioski wynikające z wykonanych badań wskazują na potrzebę poszukiwania nowych cech charakteryzujących OEE tak, aby spełniały one dwa warunki definiujące właściwy dobór parametrów sygnatur.

## **5. Oryginalność i zakres rozwiązania zagadnienia naukowego**

Doktorant rozwiązał ściśle określony problem naukowy, który dotyczył opracowania metod czasowo-częstotliwościowych przeznaczonych do analizy stanów nieustalonych sygnałów prądu i napięcia występujących przy zmianie stanu OEE.

Za elementy nowości, stanowiące oryginalne i najważniejsze rezultaty rozprawy oraz wkład Doktoranta uważam:

- opracowanie metody rejestracji sygnałów w stanach nieustalonych występujących w chwili włączenia OEE do sieci zasilającej dla następujących metod:
  - MF,
  - HF-CWT z zastosowaną ciągłą transformacją falkową,
  - HF-COR bazującej na korelacji wzajemnej,
  - HF-GEN z generacją sygnału impulsowegooraz przeprowadzenie eksperymentów w tym zakresie,
- opracowanie metod wyznaczania wielkości pomiarowych adekwatnych do zarejestrowanych sygnałów w stanach nieustalonych, a na ich podstawie opracowanie metod wyznaczania sygnatur charakteryzujących stany pracy OEE,
- opracowanie i przeprowadzenie, na podstawie wyznaczonych sygnatur, procesu klasyfikacji trzema wybranymi klasyfikatorami pod kątem poprawności wykrycia stanu włączenia każdego z badanych OEE.

Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązanie problemu naukowego, w stosunku do wyników prac przedstawionych w literaturze, pozwoliło osiągnąć lepsze rezultaty w zakresie skuteczności poprawnego wykrywania stanu włączenia OEE przy ponad dwukrotnie większej ich liczbie.

## **6. Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**

Przedstawiona do oceny rozprawa posiada właściwą objętość, pozwalającą na należyte przedstawienie poszczególnych zagadnień. Doktorant we właściwej kolejności prezentuje zagadnienia i rozwiązuje problemy, mające go doprowadzić do ostatecznego celu, jakim jest opracowanie nowej metody czasowo-częstotliwościowej do analizy stanów nieustalonych OEE.

Analizując treść rozprawy stwierdzam, że Doktorant wykazał się następującymi umiejętnościami:

- formułowania i rozwiązywania problemu naukowego,
- formułowania uzasadnionych założeń,
- wykorzystania i rozwijania właściwych metod badawczych,
- rozwiązywania postawionych zadań,
- budowy stanowisk laboratoryjnych,
- przekonującej prezentacji uzyskanych rezultatów,
- analizy osiągniętych wyników.

Praca jest na dobrym poziomie teoretycznym.

## 7. Przydatność uzyskanych wyników w praktyce

Zasadniczym kierunkiem badań przeprowadzonych przez Doktoranta była poprawa skuteczności identyfikacji stanów OEE przez systemy NILM. Prawidłowa identyfikacja stanów włączenia i wyłączenia OEE jest szczególnie ważna dla algorytmów związanych z zarządzaniem zużycia energii przez odbiorców końcowych. Zasadniczy cel rozprawy został osiągnięty w stosunku do dotychczasowych prezentowanych w literaturze systemów NILM z identyfikacją włączenia i wyłączenia OEE na podstawie analizy stanów ustalonych metodami LF i HF.

W celu zbadania możliwości praktycznego zastosowania opracowanej metody HF-COR w algorytmach zarządzania zużyciem energii Doktorant zaprezentował w rozprawie również wyniki badań, w których był włączany kolejno jeden z OEE przy działającym już innym wybranym OEE. Osiągnięte dla tych badań wyniki skuteczności klasyfikacji były zdecydowanie poniżej założonego progu 90%. W aktualnie stosowanych rozwiązaniach sprzętowych skuteczność wykrywania zmiany stanu OEE wynosi 100%. Doktorant w podsumowaniu rozprawy wskazał na potrzebę kontynuacji badań w tym kierunku i zaproponował tematykę dalszych badań. Natomiast osiągnięty przy metodzie HF-COR wysoki poziom skuteczności klasyfikacji dla pojedynczego OEE może być podstawą dalszych prac nad jej zastosowaniem w diagnostyce urządzeń elektrycznych.

## 8. Ocena tekstu rozprawy

Układ pracy jest czytelny i poprawny. Zamieszczone na końcu rozdziałów 3, 4, 5 i 6 wnioski ułatwiają czytelnikowi śledzenie całej pracy.

Język pracy jest poprawny, a edycja tekstu i równań oraz prezentacja rysunków jest staranna. Nieliczne uchybienia oraz niedociągnięcia zostały przedstawione w pkt. 9.

Autor wykazał się dobrą znajomością literatury w dziedzinie będącej tematem rozprawy. Zamieszczona w spisie literatura (156 pozycji) jest reprezentatywna dla przedmiotu badań. Poszczególne pozycje z tego spisu są umiejętnie cytowane w pracy. Doktorant jest współautorem w 10 recenzowanych publikacjach i materiałach konferencyjnych oraz w 2 patentach.

## 9. Uwagi

### 9.1. Uwagi o charakterze ogólnym

1. W rozprawie zabrakło wyraźnej deklaracji, czy opracowane metody: HF-CWT z zastosowaną ciągłą transformatą falkową, HF-COR bazującej na korelacji wzajemnej oraz HF-GEN z generacją sygnału impulsowego są nową propozycją Doktoranta?
2. W rozdziale 1.1.4 Doktorant na podstawie publikacji [59] przytacza stwierdzenie (str.23, 1g), że „przed implementacją systemu NILM konieczne jest przygotowanie odpowiedniej bazy danych stanów nieustalonych dla różnych OEE”. Czy w stosunku do odbiorników, w których przebiegi stanów nieustalonych będą się zmieniały



- w wyniku ich zużycia, takie bazy muszą być uzupełniane? Jak to w praktyce może wpłynąć na popularność stosowania systemu NILM?
3. W algorytmach zarządzania energią mogą występować OEE, które mają możliwość wyboru różnych nastaw mocy. Jak tego typu odbiorniki będą uwzględniane w systemie NILM?
  4. Przedstawione w rozprawie wyniki badań dla odbiorników o zbliżonych parametrach (np. czajnik i żelazko) wskazują, że wybrane cechy charakteryzujące te odbiorniki mają podobne wartości. Jak w przyszłości Doktorant planuje ten problem rozwiązać?
  5. Czy były badane przez Doktoranta przypadki, jak wpłynie na pracę systemu NILM włączenie odbiornika w tej samej fazie, ale w sąsiednim mieszkaniu?
  6. Na jakiej podstawie ustalono maksymalną liczbę neuronów, równą 20, w warstwie ukrytej sieci neuronowej?
  7. Czy w procesie uczenia sieci neuronowej lub drzewa decyzyjnego nie wystąpił efekt przeuczenia?
  8. Jaka zdaniem Doktoranta powinna być wartość progu całkowitej skuteczności klasyfikacji dla systemu NILM identyfikującego zmianę stanu odbiornika?

## 9.2. Uwagi o charakterze szczegółowym

1. W rozprawie występują miejscami niedoprecyzowania działań podjętych przez Doktoranta. Przykładowo tytuł podrozdziału 1.4. jest następujący: „*Metody oceny jakości klasyfikatora*”. Natomiast treści kolejnych dwóch podrozdziałów w nim zawartych nie przedstawiają zagadnień dotyczących metod oceny jakości klasyfikatora.
2. Doktorant nie uzasadnił w rozprawie (podrozdział 1.4.1) wyboru sieci neuronowych, drzewa decyzyjnego i algorytmu k-najbliższych sąsiadów do konstrukcji klasyfikatorów.
3. Czy w układach pomiarowych przedstawionych na rysunkach 4.3 i 6.9 próbkowanie obu mierzonych napięć było synchroniczne?

## 10. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Augustyna Wójcika zatytułowana „Zastosowanie metod czasowo-częstotliwościowych do analizy stanów nieustalonych odbiorników energii elektrycznej” prezentuje dobry poziom naukowy. Osiągnięcia naukowe przedstawione w rozprawie doktorskiej wpisują się w zakres dyscypliny elektronika, w której był wszczęty przewód doktorski. Osiągnięcia te również w pełni wpisują się w dyscyplinę automatyka, elektronika i elektrotechnika z dziedziny nauk inżyniersko-technicznych.

Przedstawione uwagi o charakterze ogólnym i szczegółowym w żaden sposób nie podważają przedstawionej oceny poziomu pracy.

**Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania określone przez aktualną ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Augustyna Wójcika do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

*Wierław Liczowski*