

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 błędu 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 transformatą 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