

Dr hab. inż. Wiesław Jałmużny
Instytut Elektroenergetyki
Politechniki Łódzkiej

Łódź, 16 stycznia 2015 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Pustułki
p.t. „Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do lokalizacji zwarć
w napowietrznych liniach elektroenergetycznych”

1. Dane ogólne

Niniejszą recenzję opracowano na podstawie Uchwały Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 24 listopada 2014 roku.

Praca została wykonana w Katedrze Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem Promotora prof. dr hab. inż. Jana Iżykowskiego oraz w okresie od 13.02.2012 r. do 13.04.2014 r. pod opieką Promotora pomocniczego dr inż. Mirosława Łukowicza. Rozprawa zawiera 149 stron ponumerowanych, w tym 107 stron tekstu zasadniczego, Wykaz literatury obejmuje wśród wyszczególnionych 133 pozycji: 16 monografii, 41 artykułów w liczących się czasopismach oraz publikacje w materiałach konferencyjnych i inne. W pracy zamieszczono 88 rysunków oraz 49 tabel.

2. Ocena doboru tematu, tezy i celu rozprawy

Jednym z warunków niezawodnej pracy systemu elektroenergetycznego jest zapewnienie przez jego operatorów m.in. ruchu i utrzymania sieci przesyłowych i rozdzielczych decydujących o bezpieczeństwie dostaw energii elektrycznej. Istotne znaczenie dla osiągnięcia tego celu ma zminimalizowanie czasu przerw długotrwałych spowodowanych stanami awaryjnymi sieci, wśród których stosunkowo często występującymi są zwarcia. W przypadku zwarć w napowietrznych liniach elektroenergetycznych ważnym czynnikiem jest możliwie szybkie zlokalizowanie miejsca zwarcia, które umożliwia przywrócenie linii do pracy w jak najkrótszym czasie, przeciwdziałanie zvarciom trwałym a także sprawdzenie poprawności działania zabezpieczeń.



Obok znanych, szeroko opisanych w literaturze metod lokalizacji zwarć, takich jak metoda impedancyjna, falowa czy impulsowa, istnieją metody oparte na technikach sztucznej inteligencji. Autor rozprawy, wpisując się w nurt rozważań o wysokim stopniu aktualności podjął się zbadania i oceny zagadnienia wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do lokalizacji zwarć w napowietrznych liniach elektroenergetycznych. Wobec coraz wyższych wymagań stawianych przed automatyką elektroenergetyczną, tematykę ocenianej pracy doktorskiej należy uznać za trafną. W rozdziale 2.2 sformułowano tezę, która wynika z rozeznania literaturowego Doktoranta w piśmiennictwie krajowym i zagranicznym obejmującym szeroki zakres zagadnień, także tych, które nie wiążą się bezpośrednio z tematyką rozprawy. Z postawioną tezę powiązano, stawiający przed autorem wysokie wymagania w odniesieniu do doboru materiału badawczego i wyboru właściwych metod badawczych, nakreślony cel pracy – weryfikację możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych do lokalizacji zwarć w napowietrznych liniach elektroenergetycznych.

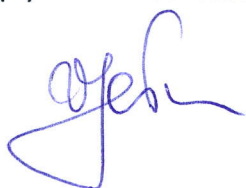
3. Charakterystyka i ocena treści merytorycznej rozprawy

1. rozdział pracy zawiera ogólną charakterystykę tematyki rozprawy, z kolei w **rozdziale 2.** skupiono uwagę nie tylko na sformułowaniu tezy i celu pracy, lecz sformułowano także założenia i algorytm procesu lokalizacji oraz w czytelnej formie graficznej przedstawiono zwięzły przegląd literatury.

W **rozdziale 3.** przedstawiono historyczny i aktualny aspekt linii przesyłowych energii elektrycznej oraz scharakteryzowano linię elektroenergetyczną wybraną do badania algorytmów lokalizacyjnych.

Rozdział 4. porusza stosunkowo rozległą problematykę, dotyczącą m.in.: analizy i oceny zakłóceń, przyczyn i skutków zwarć, zadań elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, modelowania zwarć oraz symulacyjnego wyznaczania przebiegów zwarciovych. Moim zdaniem, z korzyścią dla przejrzystości rozprawy, można by zakres omówionych w tym rozdziale kwestii ograniczyć do zagadnień pozostających w bliższym jej kręgu tematycznym.

W **rozdziale 5.** omówiono przetwarzanie sygnałów w zabezpieczeniach cyfrowych ze szczególnym zwróceniem uwagi na cyfrowe filtrowanie sygnałów, którego jakość ma istotny wpływ na właściwości algorytmów pomiarowych w stanach dynamicznych.



Rozważania **rozdziału 6.** dotyczą przekładników, nazwanych przez autora w tytule rozdziału przekładnikami pomiarowymi, chociaż przedmiotem rozważań są przekładniki do zabezpieczeń zwane też „zabezpieczeniowymi”. W pracy zwrócono szczególną uwagę na znaczenie, jakie dla poprawnej współpracy z zabezpieczeniami mają właściwości metrologiczne przekładników w stanach przejściowych. Znaczne błędy transformacji przekładników pracujących w tych warunkach są spowodowane przede wszystkim przez zjawisko nasycania obwodu magnetycznego przekładników indukcyjnych. Problem ten dotyczy zarówno przekładników prądowych klasy P, w których proces nasycania rozpoczyna się najczęściej przed upływem połowy okresu przebiegu prądu, jak i przekładników napięciowych pojemnościowych, których nieodłączną częścią jest przekładnik napięciowy indukcyjny. Wzrost błędów dynamicznych przekładników może spowodować wadliwe zadziałanie szybkich zabezpieczeń. Doktorant, zauważając konieczność poprawy charakterystyki metrologicznej przekładników w stanach przejściowych nie wyjaśnia, mówiąc o kompensacji błędów dynamicznych przekładników prądowych i napięciowych, że jest to zabieg „zewnętrzny” w stosunku do przekładnika a nie działanie polegające na zredukowaniu błędów metodami techniczno-konstrukcyjnymi samego przekładnika. W odniesieniu do przekładników pracujących w warunkach sprzyjających stanowi nasycenia obwodu magnetycznego, autor używa wyłącznie określenia „nasycenie przekładnika”, podczas gdy punkt pracy obwodu magnetycznego pozostaje w części nasyceniowej charakterystyki magnesowania przez określony czas, po którym przechodzi do części poniżej indukcji nasycenia itd. W związku z tym właściwym powinno być określanie takiego stanu pracy mianem „nasycania przekładnika”.

W **rozdziale 7.** omówiono dwa algorytmy lokalizacji zwarców, oparte na wykorzystaniu wyników pomiarów wykonanych na jednym końcu lub na obydwu końcach linii. Podano modele pętli zwarcowych i określono ich parametry dla różnych rodzajów zwarców. Przy pominięciu drobnych usterek formalnych, które zostaną wyszczególnione w uwagach krytycznych recenzji, należy uznać ten rozdział za dobrze opracowany fragment pracy.

Zagadnienia obejmujące zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do lokalizacji zwarców przedstawiono w **rozdziale 8.** Na podstawie właściwie dobranych pozycji literatury i własnego doświadczenia autor scharakteryzował sztuczne sieci neuronowe i struktury tych sieci oraz omówił strategie uczenia sieci neuronowych ze szczególnym zwróceniem uwagi na strukturę



nadzorowanej modyfikacji parametrów sieci i podkreśleniem zdolności sieci neuronowej do uogólniania. Scharakteryzowano proces testowania wielowarstwowych sieci jednokierunkowych.

Wyniki lokalizacji zwarć metalicznych i łukowych z uwzględnieniem procesu nasycania obwodów magnetycznych przekładników prądowych przedstawiono w **rozdziale 9**. Proces uczenia i oceny skuteczności zaproponowanej metody lokalizacji zwarć z wykorzystaniem zaprojektowanej sieci neuronowej przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu MATLAB i jego rozszerzenia w postaci biblioteki Neural Network Toolbox. Do przeprowadzenia testów sieci wykorzystano sygnały zabezpieczeniowe otrzymane z komputerowego modelowania systemu elektroenergetycznego w programie ATP-EMTP.

W **rozdziale 10**, omówiono filtrowanie cyfrowe z zastosowaniem sztucznej sieci neuronowej i jego znaczenie dla prognozowania sygnałów dogodnych dla dalszego przetwarzania. Przedstawiono wyniki przeprowadzonej lokalizacji zwarcia i błędu lokalizacji. Podkreślono korzystny wpływ dodatkowego filtrowania cyfrowego z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej.

W **rozdziale 11**, przedstawiono wnioski i uwagi sformułowane na podstawie przeprowadzonej analizy i wykonanych badań.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Recenzowana rozprawa zasługuje na pozytywną ocenę merytoryczną, jednak występują w niej, jak w każdym tego rodzaju opracowaniu, budzące wątpliwości zagadnienia dyskusyjne, błędy i usterki natury formalnej. Zadaniem recenzenta jest ich wypunktowanie.

Oczekuję ustosunkowania się Doktoranta do następujących uwag:

- 1) Na stronie 33 rozprawy wskazano na zagrożenie porażeniem ludzi i zwierząt dużym spadkiem napięcia na uziomie, przez który przepływa prąd zwarciovowy. Autor miał chyba na myśli gradient potencjału w pobliżu uziomu.
- 2) Bliższego wyjaśnienia wymaga użyte na stronie 52 (wiersz 5 od dołu) sformułowanie dotyczące mniej korzystnej charakterystyki widmowej filtrów półokresowych, szczególnie „jednego z nich, który nie tłumi składowej okresowej”.

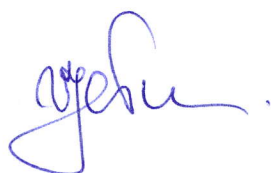


- 3) Autor stosuje sformułowanie „kompensacja błędów w przekładnikach” (str. 99, wiersz 3 od góry), mając prawdopodobnie na myśli przede wszystkim kompensację błędów dynamicznych w przekładnikach napięciowych pojemnościowych. Trudno bowiem sobie wyobrazić kompensację dynamicznego błędu transformacji przekładnika prądowego klasy P, którego rdzeń magnetyczny wchodzi w zakres nasycania już po upływie 5 milisekund od chwili przepływu prądu zwarciovego.
- 4) Na rysunkach 8.16 i 8.17 wprowadzono identyczne oznaczenia „ d_{SSN} (p.u.)” na obu osiach układu współrzędnych. Proszę o wyjaśnienie takiego stanu rzeczy.
- 5) Na stronie 112 autor stwierdza, że w algorytmie wykorzystującym pomiar po obu stronach linii niekonieczne jest przyjęcie założeń upraszczających, ale potrzebna jest komunikacja. Chyba należałoby w tym miejscu pracy wyjaśnić, czego ta komunikacja dotyczy.
- 6) W tabelach zawierających wyniki lokalizacji zwarć zamieszczono wyniki obliczenia wariancji i odchylenia standardowego. Pozostawienie odchylenia standardowe byłoby wystarczające.
- 7) W ostatnim akapicie na stronie 113 autor rozprawy formułuje wniosek, że „wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do lokalizacji zwarć w napowietrznych liniach elektroenergetycznych może być skuteczne.” Dobrze byłoby dodać, dla jakich przypadków i w jakich warunkach.

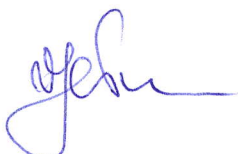
Błędy redakcyjne, stylistyczne i językowe, niedopowiedzenia, zdania niezrozumiałe

W pracy zauważono pewne nieliczne nieprawidłowości językowe. Do tych rzucających się w oczy trzeba zaliczyć sformułowania o charakterze żargonu technicznego, których powinno się unikać w pracach naukowych, np.: „moc przeciwna, moc zerowa” (tab. 4.1) zamiast – moc dla składowej przeciwnej, moc dla składowej zerowej”, „można je otrzymaćprzez pomiar”(str. 48) zamiast np. „można je otrzymaćw wyniku pomiaru”, „odległość do zwarcia” (str. 66, 72, 73) zamiast – „odległość do miejsca zwarcia”, „równanie kwadratowe na odległość...” (str. 72) zamiast – „równanie kwadratowe umożliwiające wyznaczenie odległości....” czy „Uśrednianie jest dokonywane w 40-60 ms” (str. 101) zamiast „Uśrednianie jest dokonywane w czasie 40-60 ms”.

Autor nie ustrzegł się także sformułowań i oznaczeń, zdaniem recenzenta nieprawdziwych lub niepoprawnie użytych. Spośród nich najbardziej widoczne to:



- „Ich celem (przekładników – przyp. recenzenta) jest izolacja wtórnych obwodów pomiarowych od pierwotnych....” (str. 56, wiersz 5 od góry). Izolacja to w tym przypadku nie to samo, co izolowanie.
- „Te ostatnie (przekładniki pomiarowe – przyp. recenzenta) są, między innymi, stosowane do pomiarów rozliczeniowych energii elektrycznej” (str. 56, wiersz 9 od góry). W tym przypadku powinno być użyte sformułowanie „są przede wszystkim stosowane do”.
- „.....konstruowane są (mierniki oraz przyrządy – przyp. recenzenta) na umiarkowane wartości,.....” (str. 56, wiersz 15 od góry). Powinno raczej być „.....konstruowane są na stosunkowo niewielkie napięcia i prądy,.....”.
- „W elektroenergetyce rozpowszechniane są urządzenia” (str. 56, wiersz 11 od dołu). Powinno być użyte sformułowanie: „wykorzystywane” lub „eksploatowane”.
- „.....zmniejszające w stałym stosunku (chodzi tu o przekładniki – przyp. recenzenta) wartości tych wielkości (tzn. napięć i prądów – przyp. recenzenta).” (str. 56, wiersz 6 od dołu). Poprawne sformułowanie to: „....., redukujące je do ustalonego, znormalizowanego poziomu.”
- „Od kilkunastu lat prowadzone są badania.....” (str. 57, wiersz 3 od góry). Badania nad przekładnikami niekonwencjonalnymi są prowadzone od kilkadziesiąt lat.
- „..... lecz oddzielających skutecznie obwód pomiarowy od obwodu pierwotnego.” (str. 57, wiersz 2 od góry). Chyba chodzi tu o separację galwaniczną obwodów.
- „.....przebieg prądu wyjściowego PP (przekładnika prądowego – przyp. recenzenta)” (str. 63, wiersz 1 od góry). Powinno być: „prądu wtórnego”.
- „Sztuczne sieci neuronowe (SSN) są najbardziej reprezentacyjnym przedstawicielem....” (str. 75, wiersz 4 od góry). Powinno być „.....reprezentatywnym...”.
- „...wiele prac ilustrujących wykorzystanie w zabezpieczeniach SSN.” (str. 82, wiersz 4 od góry). Powinno być: „.....wiele prac ilustrujących wykorzystanie SSN w zabezpieczeniach.”
- „W przypadku sieci jednokierunkowych i im pochodnych” (str. 87, wiersz 5 od góry). Powinno być: „... im podobnych”.



- Opis oznaczeń we wzorze (4.1) – brak jednostki współczynnika $\alpha=2,85 \cdot 10^{-5}$. Nie jest to z pewnością wielkość bezwymiarowa.
- Tradycyjnie składowa rzeczywista i urojona liczby zespolonej są oznaczane odpowiednio jako $\operatorname{Re}\{z\}$ oraz $\operatorname{Im}\{z\}$ a nie – $\operatorname{real}(z)$ i $\operatorname{imag}(z)$ (np. na rys. 8.15).

5. Ocena poziomu redakcyjnego rozprawy

Recenzowana praca zredagowana jest przejrzysto. Tekst został podzielony na 11 rozdziałów i uzupełniony wykazem literatury oraz załącznikami zawierającymi wyniki badań w postaci tabel i przebiegów czasowych błędu lokalizacji zwarcia. Treść poszczególnych rozdziałów odzwierciedla logiczny ciąg rozprawy, chociaż Doktorant nie uniknął pokusy zbyt obszernego omówienia zagadnień mniej ściśle powiązanych z tematyką pracy. Język pracy jest zrozumiały, zawiera jednak pewne błędy gramatyczne i stylistyczne a także niedopowiedzenia, wymienione przykładowo w **p. 4** recenzji. Treść rozprawy zilustrowano 88 rysunkami.

6. Podsumowanie i wnioski

Recenzowaną rozprawę, niezależnie od przedstawionych w **p. 4** uwag dyskusyjnych i drobnych błędów, oceniam dobrze. Doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną dotyczącą problematyki wyznaczania miejsca zwarcia w liniach energetycznych w zakresie, wystarczającym do poprawnego formułowania zagadnień naukowych oraz odpowiedniego doboru i wykorzystania narzędzi do ich rozwiązania.

Uważam, że cel rozprawy został osiągnięty a postawiona teza udowodniona, chociaż dla wzmocnienia wyrazistości dysertacji Doktorant powinien podkreśleniu tych dokonań poświęcić więcej uwagi.

Stosownie do przepisów ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, ze zm. w Dz. U. z 2005 r. Nr 164, poz. 1365 oraz w Dz. U. z 2011 r. Nr 84, poz. 455) wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej **mgr inż. Mateusza Pustułki** pt. „*Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do lokalizacji zwarć w napowietrznych liniach elektroenergetycznych*” do publicznej obrony.

