

Dr hab. inż. Lubomir Marciniak
Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Częstochowska
42-200 Częstochowa,
Aleja Armii Krajowej 17, p. F221
E-mail: lubmar@el.pcz.czest.pl

Częstochowa, 19.12.2014

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Pustulki
pt. „Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do lokalizacji zwarców
w napowietrznych liniach elektroenergetycznych”**

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Waldemara Rebizanta, przekazane pismem W-5/2683/2014 z dnia 26.11.2014 wraz z egzemplarzem rozprawy doktorskiej.

1. Przedmiot rozprawy

Zwarcia w napowietrznych liniach najwyższych napięć są jednymi z najczęściej występujących i groźnymi w skutkach zakłóceniami. Powodują one, oprócz ogromnych strat materialnych, długotrwałe wyłączenia linii dotkniętych zwarciami, przerwy w przesyłaniu energii elektrycznej oraz obniżenie zapasu stabilności globalnej systemu elektroenergetycznego. Skrócenie przerw w pracy linii jest więc istotnym czynnikiem zwiększenia niezawodności zasilania. Ważnym środkiem do osiągnięcia tego celu jest poprawa dokładności lokalizacji miejsca zwarcia.

Stosowane obecnie lokalizatory impedancyjne wskazują miejsce zwarcia z dokładnością rzędu $0,5 \div 3\%$ długości linii. W przypadku linii o długości 100 km lub większej taka dokładność jest niewystarczająca. Doskonalenie sposobów lokalizacji zwarców w oparciu o wykorzystanie nowych technik cyfrowego przetwarzania informacji, w tym w oparciu o wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych (SSN), jest istotne zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do lokalizacji zwarców w napowietrznych liniach elektroenergetycznych” stanowi udaną próbę rozwiązania ważnego i aktualnego problemu



lokalizacji zwarć z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi i metod badawczych. Jej głównym celem jest udowodnienie zasadności wykorzystania SSN do lokalizacji zwarć w liniach napowietrznych najwyższych napięć.

2. Przegląd treści rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska liczy łącznie 149 stron i składa się z wykazu ważniejszych oznaczeń, 11 rozdziałów zasadniczych, spisu literatury (punkt 12) oraz załącznika (punkt 13).

Rozdział 1 zawiera uzasadnienie celowości prowadzenia prac badawczych zmierzających do poprawy dokładności lokalizacji zwarć poprzez doskonalenie algorytmów pomiarowych z zastosowaniem technik sztucznej inteligencji.

W rozdziale 2 sformułowano tezę pracy w brzmieniu: „**Istnieje możliwość wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do przeprowadzenia dokładnej lokalizacji zwarć w napowietrznych liniach elektroenergetycznych**”, której udowodnienie postawiono za główny cel pracy. Wymagało to wykonania szeregu zadań badawczych, zasygnalizowanych przez Doktoranta.

W rozdziale 2 przeprowadzono bardzo ogólnikowy przegląd literatury dotyczącej lokalizacji zwarć. Rozdział 3 zawiera rys historyczny rozwoju linii elektroenergetycznych oraz lakoniczny opis modelu systemu elektroenergetycznego użytego do badań.

W rozdziale 4 przedstawiono klasyfikację zwarć, omówiono ich przyczyny i skutki oraz określono zadania i funkcje automatyki zabezpieczeniowej. W rozdziale tym omówiono też sposoby modelowania zwarć oraz opisano model dynamiczny łuku zwarciovego zaimplementowany w programie ATP-EMTP, który wykorzystano do symulacji zwarć łukowych.

Rozdział 5 zawiera podstawowe informacje o metodach cyfrowego przetwarzania sygnałów stosowanych w automatyce zabezpieczeniowej. Szczegółowo opisano w nim filtry ortogonalne z oknami sinus i kosinus, które wykorzystano do wstępnej filtracji sygnałów napięciowych i prądowych.

Rozdział 6 zawiera podstawowe informacje na temat przekładników prądowych i napięciowych stosowanych w układach pomiarowych automatyki zabezpieczeniowej.

W rozdziale 7 przedstawiono dwa algorytmy lokalizacji zwarć, które wykorzystano do badań porównawczych z opracowanym lokalizatorem neuronowym:

- algorytm Takagiiego oparty na pomiarach prądów i napięć na jednym końcu linii;

– algorytm wykorzystujący pomiary z obu końców linii.

W rozdziale 8 omówiono zastosowanie do lokalizacji zwarć sztucznych sieci neuronowych. W szczególności opisano:

- zakres zastosowań SSN,
- struktury SSN, w tym zastosowaną w pracy sieć jednokierunkową dwuwarstwową,
- strategie uczenia sieci,
- zdolność uogólnienia sieci,
- wybór sygnałów zasilających SSN,
- testowanie sieci.

Rozdział 9 omawia zakres i sposób badań dokładności lokalizacji zwarć rozpatrywanymi w pracy metodami: z wykorzystaniem algorytmu Takagiego, algorytmu z pomiarami dwustronnymi oraz za pomocą SSN.

W rozdziale 10 omówiono wyniki badań lokalizatora opartego na SSN z dodatkowym wykorzystaniem SNN do wstępnej filtracji sygnałów pomiarowych.

Rozdział 11 zawiera podsumowanie wyników pracy. Punkt 12, oznaczony przez autora jak rozdział, to spis literatury zawierający 133 pozycje. Punkt 13, tj. załącznik, zawiera obszerne, 25 stronicowe zestawienie wyników badań dokładności lokalizacji zwarć rozpatrywanymi metodami.

3. Ocena merytoryczna treści rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest oryginalnym i wartościowym opracowaniem naukowym zarówno pod względem poznawczym jak i praktycznym, zawierającym obszerne i ciekawe wyniki badań eksperymentalnych opartych na symulacjach.

Prawidłowo uzasadniono celowość badań naukowych zmierzających do poprawy dokładności lokalizacji zwarć, sformułowano odważną tezę pracy, zakładającą możliwość wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do poprawy dokładności lokalizacji zwarć w napowietrznych liniach elektroenergetycznych i przeprowadzono jej dowód.

Problem naukowy przedstawiony przez Doktoranta został rozwiązany w rozdziałach 7÷11 i 13, w których przedstawiono opisy wykorzystanych algorytmów pomiarowych, modelu lokalizatora z zastosowaniem SSN oraz wyniki badań symulacyjnych dokładności lokalizacji zwarć znanymi metodami oraz za pomocą opracowanego modelu lokalizatora z SSN.



Do udowodnienia tezy wykorzystano właściwe narzędzia badawcze w postaci programów symulacyjnych ATP-EMTP i Matlab. W środowisku programu ATP-EMTP wykonano model systemu elektroenergetycznego z wydzieloną linią napowietrzną 400 kV, zasymulowano i zarejestrowano przebiegi tysięcy zwarć różnego rodzaju, które wykorzystano do testowania algorytmów lokalizacji zwarć i uczenia sieci neuronowej. Natomiast w środowisku Matlab opracowano model lokalizatora neuronowego oraz zaimplementowano, do celów badań porównawczych, algorytm pomiarowy Takagiego oraz algorytm oparty na pomiarach dwustronnych. Model lokalizatora neuronowego i zaimplementowane algorytmy lokalizacyjne poddano wszechstronnym badaniom symulacyjnym w celu określenia dokładności lokalizacji zwarcia w zależności od istotnych parametrów systemu elektroenergetycznego, rezystancji zwarcia i procesu lokalizacji: długości linii, kąta rozchyłu źródeł na obu końcach linii, liczby przewodów fazowych uczestniczących w zwarcu, rodzaju i parametrów rezystancji zwarcia (rezystancja stała i nieliniowa w postaci łuku dynamicznego), miejsca zwarcia, czasu opóźnienia pomiaru odległości, parametrów filtrów wstępnego przetwarzania sygnałów napięciowych i prądowych.

W wyniku badań symulacyjnych udowodniono ponad wszelką wątpliwość lepszą dokładność modelu lokalizatora neuronowego w odniesieniu do dokładności uzyskiwanej za pomocą pozostałych algorytmów. Innymi słowy, udowodniono zasadność stosowania SSN dla poprawy dokładności pomiaru odległości do miejsca zwarcia, co było głównym celem pracy.

Wyniki badań mają dużą wartość praktyczną, gdyż mogą być wykorzystane do opracowania prototypu lokalizatora neuronowego.

4. Ocena struktury rozprawy doktorskiej, podziału treści i poprawności językowej

Praca napisana jest dobrym językiem naukowo-technicznym. Autor używa właściwej terminologii i zrozumiałych zwrotów technicznych. Ilość błędów gramatycznych i edycyjnych (literówek) jest stosunkowo niewielka. Szata graficzna pracy nie budzi większych zastrzeżeń. Zamieszczone rysunki są czytelne i dobrze dobrane. Wątpliwości budzi jedynie rozmieszczenie rysunków zawierających przebiegi symulacyjne (rys. 4.5, 4.9, 8.10, 10.3) na dwóch stronach bez stosownych podpisów pod rysunkiem na każdej stronie.

Struktura pracy oraz podział treści na rozdziały, w przeciwieństwie do wartości merytorycznej, pozostawiają wiele do życzenia. Liczba rozdziałów jest zdecydowanie za



duża. Rozdziały 3, 4, 5 i 6 zawierają przeważnie wiedzę bardzo ogólną, wręcz podręcznikową, i mogłyby być z powodzeniem usunięte, za wyjątkiem p. 3.2, p. 4.8 i p. 5.5.

Opis testowego modelu systemu elektroenergetycznego w p. 3.2 jest zdawkowy, wręcz ascetyczny. Brakuje w nim szczegółów dotyczących zwłaszcza modelu linii. Podobnie skąpo opisano model łuku zwarciovego w p. 4.8.3. Podano tam zakres zmienności parametrów łuku bez uściślenia, przy jakich konkretnie parametrach łuku wykonano symulacje.

Wyniki przedstawione w rozdziałach 9 i 13 (załącznik) zasługują na zdecydowanie obszerniejsze objaśnienia i dyskusję. Na przykład należało szerzej wyjaśnić, w jaki sposób uśredniano błędy pomiaru odległości (dla jakich zakresów zmienności parametrów i dla jakiej populacji symulacji zrobiono uśrednianie). Ważne, z merytorycznego punktu widzenia, wyniki badań powinny być zamieszczone, zdaniem recenzenta, w części głównej pracy, a nie w załączniku.

Spis literatury dołączony do pracy zawiera dobrze dobrane, właściwe dla tematyki rozprawy, pozycje. W zdecydowanej większości są to publikacje nowe, opublikowane po roku 2000 w renomowanych czasopismach zachodnich. Autor rozprawy prawidłowo cytuje kluczowe pozycje literaturowe, jednak około połowy publikacji zamieszczono czysto formalnie, z odwołaniem do nich w postaci rysunku kołowego (rys. 2.2) z bardzo zgrubnym podziałem na kategorie. Oprócz tego trudno zrozumieć, dlaczego Doktorant zamieścił w spisie literatury tylko jedną z pośród dziewięciu swoich publikacji.

5. Główne osiągnięcia Doktoranta

Za główne, oryginalne osiągnięcie Doktoranta można uznać **opracowanie w środowisku programu Matlab modelu impedancyjnego lokalizatora zwarć w postaci sieci neuronowej**. Wiąże się ono z szeregiem osiągnięć cząstkowych, do których można zaliczyć:

- wybór i weryfikację algorytmów wstępnego przetwarzania sygnałów napięciowych i prądowych dla przygotowania danych wejściowych dla sieci neuronowych,
- wybór odpowiedniej struktury sieci neuronowej do lokalizacji zwarć i poddanie jej procesowi uczenia,
- opracowanie filtru neuronowego do dodatkowej filtracji sygnałów wejściowych lokalizatora neuronowego,
- przeprowadzenie badań dokładności lokalizacji zwarć za pomocą lokalizatora neuronowego w przypadku zwarć jedno- i wielofazowych z udziałem liniowej rezystancji zwarcia oraz zwarć łukowych.



Do ważnych osiągnięć Doktoranta można także zaliczyć:

- implementację w Matlabie algorytmu Takagiiego i algorytmu opartego na pomiarach z obu końców linii,
- przeprowadzenie badań porównawczych dokładności lokalizacji zwarć różnymi metodami i wykazanie lepszej dokładności lokalizatora neuronowego.

Do znaczących osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć niewątpliwie jego dorobek publikacyjny. Z bazy DONA PWr wynika, że jest on współautorem aż dziewięciu prac opublikowanych i jednej niepublikowanej, w tym czterech artykułów, dwóch rozdziałów w książkach, trzech referatów konferencyjnych oraz sprawozdania (raportu) naukowego.

6. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

1. Autor rozprawy doktorskiej zastosował dodatkową filtrację sygnałów pomiarowych za pomocą filtru półokresowego z oknem sinusoidalnym, który w przeciwieństwie do filtru cosinusowego, dobrze tłumi wyższe harmoniczne i nie tłumi składowej nieokresowej. Tymczasem zawartość składowej nieokresowej po 3 cyklach (po 60 ms) od momentu zwarcia może być znacząca i wpływać niekorzystnie na pomiar odległości bardziej niż wyższe harmoniczne. Dlaczego autor wybrał do dodatkowej filtracji filtr półokresowy z oknem sinus a nie kosinus? Czy wyboru dokonano w oparciu o badania wstępne?
2. Opis wykorzystania sieci neuronowej do wstępnej filtracji sygnałów prądowych i napięciowych jest co najmniej niejasny. Co oznacza zdanie na stronie 108 „Na podstawie wejść w postaci dwudziestu próbek sygnałów prądów i napięć z interwału zwarciego estymowana zostaje jedna próbka (rys. 10.3) dla każdego sygnału wyjściowego będąca wyjściem SSN”. Jak ta jedna próbka jest wykorzystywana w procesie lokalizacji, po następnych około 100 próbkach (patrz rysunek 10.3)? Czy ten filtr działa podobnie jak zwykły filtr SOI, tzn. wytwarza sygnał wyjściowy na podstawie ostatnich 20 próbek wejściowych i aktualizuje wynik po każdej następnej próbce? Czy sygnały z wyjścia tego filtru są uznawane za „wiarygodne” dopiero po 60 ms od chwili powstania zwarcia i są wynikiem przetwarzania próbek z przedziału 40÷60 ms od chwili powstania zwarcia?
3. Wyniki lokalizacji zwarć w warunkach nasycenia przekładników prądowych są trudne do zinterpretowania, gdyż podano je bez opisu stopnia i czasu trwania nasycenia przekładników. Nasycenie można „odczekać”. Po 60 ms jest ono zwykle niewielkie. Czy Autor mógłby przybliżyć warunki nasycenia przekładników?

4. Jakim wartościom i zakresom zmienności parametrów oraz jakiej liczbie symulacji odpowiadają wyniki badań dokładności lokalizacji przedstawione w rozdziałach 9 i 13 (załącznik)?
5. Dokładność lokalizacji zwarć uzyskiwana za pomocą lokalizatora z SSN w przypadku zwarć łukowych jest większa niż w przypadku zwarć z udziałem stałej rezystancji R_F . Czy można to jakoś wyjaśnić? Jaka relacja zachodziła między maksymalną wartością rezystancji łuku R_{arc} a maksymalną wartością rezystancji zwarcia R_F podczas symulowanych zwarć?
6. Czy badano wpływ niesymetrii fazowej parametrów linii na dokładność lokalizacji?
7. W pracy pominięto zagadnienia dotyczące wpływu błędów transformacji i kwantyzacji sygnałów prądowych i napięciowych. Czy szacowano, przy jakiej rozdzielczości przetworników analogowo-cyfrowych można pominąć błędy kwantyzacji prądu i napięcia?
8. Ocenę dokładności lokalizacji zwarć oparto wyłącznie na przebiegach symulacyjnych. Czy podejmowano próby weryfikacji wyników na podstawie dobrze udokumentowanych przebiegów rzeczywistych, pochodzących z rejestratorów zakłóceń i z jakim skutkiem?

7. Uwagi redakcyjne

1. Zamieszczony na rysunku 4.7 fragment programu do modelowania łuku jest nieczytelny.
2. Charakterystyki łuku przedstawione na rysunku 4.9b,c są bardzo niedokładne, przez co są niewiarygodne. Prawdopodobnie wykonano je z bardzo dużymi krokami całkowania numerycznego i „plotowania”, rzędu 1 ms, co powoduje duże odstępstwo załączonych charakterystyk od oczekiwanych.
3. Każdy z rysunków 4.5, 4.9, 7.1, 8.10 i 10.3, mogłby być umieszczony na jednej stronie, ze względu na lepszą czytelność. Rozmieszczanie rysunków na dwóch stronach bez stosownych podpisów pod każdą częścią jest uważane za błąd edycyjny.
4. Zwrot „zwarcia liniowe”, występujący na str. 8 i wielokrotnie powtarzany dalej, jest chyba nieodpowiedni. Chodzi przecież o zwarcia przez rezystancję R_F o stałej, niezależnej od prądu, wartości.
5. Zdanie na str. 46 „System zabezpieczeniowy powinien spełniać następujące funkcje, takie jak:” jest niepoprawne stylistycznie.
6. Wzory (5.2) i (5.4) powtarzają się.
7. Tabele 7.1 na str. 65 i na str. 67 mają te same numery.
8. Błędy gramatyczne i literówki:



- a) na str. 11 zamiast „zastosowanie” należało użyć „zastosowania”;
- b) określenia „Elektroenergetyczna Automatyka Zabezpieceniowa” na str. 19, „Automatyczne Ponowne Załączanie” na str. 29, „Systemy Ekspertowe, Systemy Rozmyte, Sztuczne Sieci Neuronowe i Algorytmy Genetyczne” na str. 77 powinny być pisane małymi literami, gdyż nie są to nazwy własne;
- c) zwrot „pasmowo przepustowe” na str. 52 powinien być napisany w formie „pasmowoprzepustowe”;
- d) zamiast znaku „<=” na stronie 52 i w kilku innych miejscach należało użyć „≤”;
- e) zamiast zwrotu „mierzone ze stacji lokalnej” należało użyć „mierzone w stacji lokalnej”;
- f) zdanie na str. 68 „Z tego względu, by zapewnić na tej gałęzi spadek napięcia: V_F , jak występujący w rzeczywistości, impedancja tej fikcyjnej gałęzi nie jest ...” jest niepoprawne stylistycznie i niezrozumiałe;
- g) na str. 78 zamiast „p wystąpieniu” i „prze człon” należało użyć „po wystąpieniu” i „przez człon”;
- h) fragment zdania „... natomiast w tabelach 13.13 – 13.18 zastosowano dodatkową filtrację ...” jest niepoprawny stylistycznie.

Przedstawione powyżej uwagi nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy i nie umniejszają osiągnięć autora.

8. Wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie aktualnego i ważnego problemu naukowego i praktycznego. Doktorant właściwie wykorzystał zaproponowane metody badawcze i modele matematyczne do osiągnięcia założonego celu.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Pustułki pt. **Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do lokalizacji zwarć w napowietrznych liniach elektroenergetycznych** spełnia ustawowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich zawarte w art. 13 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 z późniejszymi zmianami). W związku z tym wnioskuję do Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej we Wrocławiu o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

