

## RECENZJA

### rozprawy doktorskiej mgr inż. Bernarda Wiecha pt: „Nowe kryteria detekcji zwarć doziemnych w sieciach rozdzielczych średniego napięcia”

#### 1. Dane ogólne

Podstawą wykonania recenzji rozprawy doktorskiej, jest pismo Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Waldemara Rebizanta, powołujące się na uchwałę Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 17 czerwca 2019 roku oraz opracowanie pod ww. tytułem, o objętości 106 stron razem z wykazem literatury.

#### 2. Charakterystyka tematu i tezy

Od wielu lat obserwuje się podejmowanie działań w obrębie szeroko rozumianej elektroenergetyki związane z zaspokojeniem rosnącego popytu na energię elektryczną. Działania te ukierunkowane są, m.in. na zaspokojenie oczekiwań i wymagań odbiorców energii w odniesieniu do jej parametrów jakościowych jak i niezawodności dostaw. Wymagania te są jednocześnie konfrontowane z procesami decentralizacji i urynkowania elektroenergetyki, których ważnym aspektem są zagadnienia (kryteria) ekonomiczne. Wynika z tego potrzeba przededefiniowania tradycyjnego podejścia do zagadnień eksploatacji, planowania i automatyzacji pracy systemu elektroenergetycznego (SEE), którego głównym wątkiem były wymagania techniczne, uzupełniając je uwarunkowaniami ekonomicznymi oraz administracyjno-prawnymi. Traktując pracę SEE lub wydzielonych w nim struktur funkcjonalnych i topologicznych, jako proces przede wszystkim techniczny, wymagania jakościowe i niezawodnościowe generowanej, dystrybuowanej i użytkowanej energii elektrycznej wymuszają konieczność zapewnienia wysokich wymagań technicznych pracy sieci elektroenergetycznej. Uwzględniając rozwijającą się decentralizację funkcjonalną struktur sieciowych, np. przez wyodrębnianie obszarów sieciowych lokalnie bilansujących się, powstawanie tzw. klastrów energii, wprowadzanie technologii klasy smart, zwiększający się udział lokalnych źródeł energii elektrycznej o różnorodnej postaci energii pierwotnej, a co za tym idzie dyspozycyjności mocy, wymuszają postrzeganie pracy systemu elektroenergetycznego, jako procesu silnie dynamicznego o dużym stopniu rozproszenia funkcjonalnego i decyzyjnego, co wymusza dużą elastyczność działania i nadążną adaptację do pojawiających się wymagań i oczekiwań zarówno o charakterze technicznym jak i ekonomicznym.

Jednym ze składników warunkujących odpowiedni poziom elastyczności w zarządzaniu pracą systemu elektroenergetycznego jest wyposażenie jego struktur w odpowiednio wyposażoną i skoordynowaną automatykę elektroenergetyczną. Od wielu lat obserwuje się stały rozwój cyfrowej automatyki elektroenergetycznej, w tym również elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ), która coraz częściej wspomagana jest rozwijającą się infrastrukturą teleinformatyczną. Stwarza to potencjalnie szerokie możliwości rozwoju EAZ, m.in. w zakresie opracowywania nowych lub wzbogacania istniejących algorytmów pomiarowych i decyzyjnych, często wykorzystujących tzw. techniki inteligentne.

Zapewnienie skuteczności działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, tj. krótkich czasów podejmowania decyzji, przyporządkowujących stan

pracy nadzorowanego obiektu do klasy „praca normalna” lub „praca zakłóceniewa” jak również wysokiej selektywności i niezawodności działań, pociąga za sobą konieczność ciągłego udoskonalania układów pomiarowych i stosowanych kryteriów decyzyjnych. Udoskonalanie „jakości” wykorzystywanych technik pomiarowych i decyzyjnych może przyjmować różne formy, np.:

- adaptacji struktur automatyki zabezpieczeniowej do aktualnych warunków pracy chronionego obiektu zarówno w kontekście formy przetwarzania sygnałów pomiarowych jak i podejmowania decyzji,
- korekcji lub modyfikacji stosowanych algorytmów decyzyjnych, wykorzystując pełne spektrum wiedzy zawartej w sygnałach pomiarowych a nie bazując na wyodrębnionych w procesie filtracji tzw. składowych użytecznych,
- wykorzystania w procesie decyzyjnym informacji zawartych w stanach nieustalonych o dużej dynamice, charakterystycznych dla początkowego czasu wystąpienia zakłóceń, szczególnie zwarć łukowych lub rezystancyjnych.

Recenzowana praca jest dobrym przykładem działalności badawczej w zakresie nowoczesnych technik pomiarowych i decyzyjnych w cyfrowych zabezpieczeniach elektroenergetycznych dedykowanych sieciom dystrybucyjnym SN jako skuteczny środek ochrony przed skutkami zwarć doziemnych. Doktorant, jako cel główny rozprawy przyjął rozwiązanie trudnego problemu, tj. opracowania nowej metody detekcji zwarć doziemnych w sieciach średniego napięcia o różnym sposobie uziemienia punktu neutralnego.

Opracowane algorytmy detekcji mają poprawić czułość wykrywania, m.in. zwarć:

- niskorezystancyjnych charakteryzujących się jednak niewielkim przyrostem napięcia i prądów składowej kolejności zerowej mierzonych w zabezpieczanych liniach,
- przerywanych o długich przerwach między kolejnymi zapłonami łuku zwarciovego.

W tym celu Doktorant stosuje algorytmy matematycznego programowania nieliniowego bez ograniczeń do optymalizacji filtrów wieloczęstotliwościowej ortogonalizacji sygnałów pomiarowych (składowych zerowych napięcia oraz prądów) wykorzystywanych w procesie decyzyjnym. Filtry ortogonalizujące wykorzystane są do wyznaczenia całkowitej mocy bierniej składowych harmonicznych zawartych w wybranym paśmie częstotliwości w celu określenia linii doziemionej. Wielkość ta stanowi wstępne kryterium detekcji doziemienia. W celu zmniejszenia wpływu rezystancji w miejscu zwarcia na otrzymane wyniki, Doktorant normalizuje kryterium mocowe, względem sumy kwadratów amplitud harmonicznych napięcia z przyjętego zakresu częstotliwościowego. Uzyskuje w ten sposób uogólnione wielowymiarowe kryterium quasi-admitancyjne. Wymiar tego kryterium definiowany jest zawartością składowych admitancyjnych kolejności zerowej o częstotliwości podstawowej oraz uwzględnianych wyższych harmonicznych. Wykorzystując programowanie nieliniowe, Doktorant minimalizuje przyjętą funkcję celu, tj. błąd średniokwadratowy między docelowymi a aktualnymi decyzjami chwilowymi dla danego wzorca treningowego (przypadku doziemienia). Wykorzystując opracowany zestaw wzorców treningowych w procesie optymalizacji następuje modyfikacja parametrów algorytmu decyzyjnego, tj. współczynników quasi-ortogonalnych pasmowo przepustowych filtrów cyfrowych oraz progów decyzji chwilowej. Wyznaczanie w kolejnych krokach koniecznych zmian parametrów algorytmu decyzyjnego oparto o zmodyfikowany algorytm optymalizacyjny Levenberga-Marquardta wykorzystujący hesjan funkcji celu.

Bazując na opracowanym wieloczęstotliwościowym kryterium quasi-admitancyjnym, Doktorant formułuje cztery kryteria cząstkowe – będące uproszczeniem algorytmu admitancyjnego, mianowicie:

- optymalizowane wieloczęstotliwościowe kryterium czynnomocowe,
- optymalizowane wieloczęstotliwościowe kryterium biernomocowe,
- optymalizowane wieloczęstotliwościowe kryterium konduktancyjne,
- optymalizowane wieloczęstotliwościowe kryterium susceptancyjne

Na potrzeby oceny „jakości” działania sformułowanych algorytmów Doktorant opracował wielowariantową, bogatą bazę przypadków zwarć doziemnych w sieciach SN, pracujących z

różnie uziemionym punktem neutralnym. Zamodelowane przypadki uwzględniaty, m.in.: błędy pomiarowe przetworników pomiarowych, nieliniowość charakterystyki magnesowania filtrów składowej zerowej prądu, losowe obciążenie przekładnika Ferrantiego, losowy stopień kompensacji sieci, zmienne wartości rezystancji przejścia oraz modele łuku zwarcowego. Opracowana baza pozwoliła na wyodrębnienie danych treningowych i testowych służących optymalizacji i weryfikacji poprawności decyzyjnej badanych algorytmów.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na wyselekcjonowanie najbardziej skutecznych kryteriów wieloczęstotliwościowych dla trzech sposobów pracy punktu neutralnego sieci SN oraz wyznaczenie „optymalnych” długości okien filtrów ortogonalizujących jak i filtrów uśredniających. Następnie, dla wyróżnionych algorytmów (konduktancyjnego i susceptancyjnego), przeprowadzono analizę porównawczą ich działania w stosunku do konwencjonalnych algorytmów admitancyjnych. Uzyskane rezultaty potwierdziły wyraźną poprawę skuteczności decyzyjnej opracowanych przez Doktoranta algorytmów wieloczęstotliwościowych. Szczególnie jest to widoczne w sytuacjach, kiedy w procesie decyzyjnym algorytmy wykorzystują analizę stanów przejściowych wywołanych przez nieliniowy lub niestacjonarny charakter zjawisk fizycznych występujących w miejscu doziemienia.

Opracowana grupa kryteriów wykrywania zwarć doziemnych w sieciach SN wykorzystująca w podejmowaniu decyzji szerokie spektrum częstotliwościowe wejściowych sygnałów pomiarowych oraz informacje wnoszone przez stany przejściowe towarzyszące zwarciom doziemnym w sposób znaczący poprawia skuteczność ich działania w stosunku do kryteriów klasycznych, bazujących zazwyczaj na parametrach składowych podstawowych sygnałów pomiarowych.

Przyjęty cel rozprawy określa w pewien sposób jej zakres obejmujący m.in. charakterystykę sieci rozdzielczych SN pod kątem sposobu uziemienia punktu neutralnego, omówienie zwarć występujących w systemie elektroenergetycznym (SEE) ze szczególnym uwzględnieniem zwarć doziemnych, przedstawienie sposobów i cech układów pomiaru wielkości stanowiących podstawę procesu decyzyjnego, charakterystyka tradycyjnych kryteriów zabezpieczeniowych wykorzystywanych do detekcji doziemień w sieciach SN, krótkie przedstawienie kryteriów decyzyjnych wykorzystujących transformatę Hilberta oraz wieloczęstotliwościowy obraz admitancji pomiarowej, opracowanie modeli fragmentu sieci rozdzielczej, w której przeprowadzono symulacje, opracowanie modelu przekładnika Ferrantiego, wariantowe opracowanie modelu zakłócenia ze stabilnymi oraz zmiennymi parametrami, modele zwarć przerywanych oraz rezystancyjnych, wprowadzenie do nieliniowego programowania matematycznego bez ograniczeń wykorzystywanego do optymalizacji sformułowanego quasi-admitancyjnego kryterium decyzyjnego bazującego na algorytmie tzw. decyzji chwilowej, opracowanie wieloczęstotliwościowych kryteriów zabezpieczeniowych będących odpowiednikami klasycznych opartych na: mocy czynnej i biernej, konduktancji oraz susceptancji. Konsekwencją analiz teoretycznych było przeprowadzenie licznych i bogatych informacyjnie symulacji stanów zakłóceniovych. Uzyskane wyniki symulacji pozwoliły na weryfikację poprawności działania nowych kryteriów detekcji doziemień oraz wybrania kryteriów o najwyższym stopniu poprawności generowanych decyzji, których działanie zostało następnie skonfrontowane – poprzez analizę porównawczą – z odpowiadającymi im algorytmami „klasycznymi”. Rozprawę Doktorant podsumowuje uwagami dotyczącymi cech sygnałów pomiarowych wykorzystywanych w działaniach decyzyjnych przez kryteria zabezpieczeniowe, akcentując przydatność informacyjną stanów nieustalonych doziemień w podejmowaniu prawidłowych decyzji zabezpieczeniowych, celowości opracowania kryteriów wieloczęstotliwościowych oraz ich skuteczności w porównaniu do tradycyjnych metod. Recenzowaną pracę uzupełnia aktualny i reprezentatywny zestaw literatury obejmujący 99 pozycji.

W tym kontekście uważam, że zarówno temat jak i cel oraz zakres rozprawy zostały wybrane zgodnie z aktualnymi potrzebami i trendami badawczymi w kraju i na świecie.

Główną tezę naukową pracy sformułowano na stronie 11 następująco:

*„Istnieje możliwość optymalizacji charakterystyk wieloczęstotliwościowych filtrów ortogonalizujących, które pozwalają wykorzystać dostępne formuły obliczeniowe konduktancji i susceptancji do detekcji zwarć doziemnych w sieciach rozdzielczych SN”*

Biorąc pod uwagę łącznie temat, cel i zakres oraz powyższą tezę naukową należy stwierdzić, że rozpatrywane zagadnienie ma charakter naukowy odpowiedni na rozprawę doktorską.

### **3. Charakterystyka rozwiązania zagadnienia i użytych metod**

Ze sformułowanego celu, zakresu oraz tezy rozprawy wynika, że podstawowym zamierzeniem Doktoranta było opracowanie wieloczęstotliwościowych algorytmów decyzyjnych implementowanych w cyfrowych zabezpieczeniach sieci dystrybucyjnych SN do detekcji zwarć doziemnych oraz przeprowadzenie bogatych i wielowątkowych badań symulacyjnych w celu określenia ich właściwości w zakresie minimalizacji błędu decyzyjnego, zwłaszcza w stanach nieustalonych zwarcia oraz porównania właściwości w zakresie poprawności i selektywności działania nowych algorytmów z algorytmami realizującymi kryteria tradycyjne. Sposób postawienia i rozwiązania tego problemu, przeprowadzone i przedstawione analizy teoretyczne jak i zastosowane środki symulacyjne dowodzą, że Doktorant zna i swobodnie posługuje się metodami pracy naukowej.

Recenzowana praca podzielona jest na 8 rozdziałów o różnej objętości i zakresie tematycznym, zawiera ponadto wykaz ważniejszych oznaczeń, skrótów oraz spis literatury tematu. Treść pracy można usystematyzować następująco: wprowadzenie do tematyki pracy, charakterystyka sposobu pracy punktu neutralnego sieci rozdzielczych w kontekście kryteriów zabezpieczeniowych wykorzystywanych do detekcji zwarć doziemnych, omówienie kryteriów detekcji doziemnych na bazie przeglądu literaturowego – rozdział 1; określenie celów, głównej tezy pracy oraz przyjętych założeń w modelu sieci SN – rozdział 2; charakterystyka sieci rozdzielczych pod kątem cech wynikających ze sposobu pracy jej punktu neutralnego, syntetyczne omówienie zwarć występujących w SEE, uproszczona analiza zwarć doziemnych w sieciach SN wraz z opisem parametrów charakterystycznych dla sieci SN – rozdział 3; charakterystyka filtrów składowej zerowej napięcia i prądów, omówienie „klasycznych” kryteriów ziemnozwarciowych oraz kryteriów niekonwencjonalnych wykorzystujących transformatę Hilberta oraz wieloczęstotliwościowe spektrum admitancyjne – rozdział 4; opracowanie w programie EMTP modelu struktury obszaru sieci SN w zakresie modeli: przekładnika Ferrantiego, linii napowietrznych i kablowych, transformatora zasilającego i uziemiającego, zakłóceń harmonicznnych oraz zwarć doziemnych łukowych, przerywanych i rezystancyjnych o stacjonarnych i niestacjonarnych parametrach pozwalających na stworzenie bogatej biblioteki przebiegów testowych prądów i napięć kolejności zerowej – rozdział 5; przedstawienie ogólnej koncepcji kryterium quasi-admitancyjnego, omówienie metody jego optymalizacji za pomocą sformułowanej funkcji celu opartej o decyzje chwilowe oraz docelowe, wykorzystanie w procesie optymalizacji nieliniowego programowania matematycznego bez ograniczeń do wyznaczenia, m.in. wartości współczynników wagowych dwóch quasi-ortogonalnych filtrów cyfrowych oraz proggu decyzji chwilowej; uproszczenie formuły kryterium quasi-admitancyjnego w celu wyznaczenia wieloczęstotliwościowych kryteriów – mocowych (bierno- i czynnomocowego) oraz konduktancyjnego i susceptancyjnego – rozdział 6; przedstawienie wyników badań symulacyjnych w postaci zestawień statystycznej skuteczności opracowanych kryteriów detekcji doziemnych dla różnych sposobów pracy punktu neutralnego modelowanej sieci SN oraz różnych parametrów algorytmów, tj. częstotliwości próbkowania, długości okien pomiarowych filtrów ortogonalizujących oraz długości okna filtra uśredniającego, wyznaczenie algorytmów kryterialnych o najlepszej poprawności decyzyjnej dla danej sieci, ocena, poprzez analizę porównawczą skuteczności działania opracowanych algorytmów z ich „klasycznymi” odpowiednikami oraz przedstawienie i omówienie wybranych przypadków symulowanych zwarć doziemnych łącznie z reakcją algorytmów decyzyjnych na ich wystąpienie, analiza częstotliwościowa oraz interpretacja działania sformułowanych kryteriów

detekcji zwarć doziemnych – rozdział 7; podsumowanie przeprowadzonych badań i analiz oraz wykazanie celowości poszerzenia spektrum częstotliwościowego stosowanych kryteriów zabezpieczeniowych a dedykowanych zwarciom doziemnym w sieciach SN - rozdział 8; obszerny, wyczerpujący, liczący 106 pozycji zestaw literatury przedmiotu.

Zawarte w rozdziale pierwszym i drugim wprowadzenie w tematykę rozprawy, sprecyzowanie jej celu i przyjętych założeń oraz sformułowanie tezy jak również charakterystyka sieci rozdzielczych i stosowanych w nich kryteriów zabezpieczeniowych, będące treścią rozdziałów trzeciego i czwartego zostały już omówione w poprzednim punkcie niniejszej recenzji. Doktorant zawarł tam w sposób przejrzysty i precyzyjny swoje zamierzenia badawcze. Pewnego komentarza oczekuje się od użycia w tezie pracy sformułowania: „(...) do detekcji zwarć doziemnych”. Wydaje się zasadnym doprecyzowanie pojęcia *detekcja doziemienia*, czy odnosi się ona jedynie do wykrycia stanu zakłócenia zwarciowego czy również obejmuje identyfikację obiektu, na którym wystąpiło. Opracowane przez Doktoranta algorytmy identyfikują obiekt dotknięty zakłóceniem realizują, więc również zadanie identyfikacji.

W rozdziale piątym zawarte są dwie zasadnicze treści. W pierwszej części Doktorant formułuje modele symulacyjne badanego obiektu, m.in.:

- opracowuje model sieci SN o strukturze promieniowej z liniami napowietrznymi oraz kablowymi, modeluje (z uwzględnieniem charakterystyki magnesowania) transformator zasilający oraz uziemiający przyjętą sieć.
- Modeluje przekładnik Ferrantiego ze zmiennym sprzężeniem magnetycznym strony pierwotnej i wtórnej.
- Tworzy model zakłóceń harmoniczných w postaci źródeł napięciowych przyłączanych od strony sieci 110 kV – model zakłóceń harmoniczných napięć kolejności zgodnej i przeciwnej oraz za pomocą źródeł prądowych przyłączonych do szyn 20 kV stacji – model harmoniczných napięć fazowych kolejności zerowej.

Druga część rozdziału piątego poświęcona jest modelowaniu zwarć doziemnych o stałych i zmiennych parametrach obejmujących: zwarcia łukowe, przerywane, metaliczne oraz rezystancyjne (o stałej i liniowej rezystancji). Zwarcia łukowe modelowano:

- ze stacjonarną stałą czasową,
- z asymetrycznymi napięciami zapłonu,
- jako przerywane.

Opracowane modele i przeprowadzone symulacje pozwoliły w konsekwencji na stworzenie bogatej i reprezentatywnej biblioteki przebiegów czasowych prądów i napięć, stanowiących wejściowe sygnały pomiarowe większości współczesnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Rozdział szósty stanowiący nowatorski wkład Doktoranta w zakresie opracowania nowych algorytmów decyzyjnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych zawiera ogólną koncepcję kryterium quasi-admitancyjnego wyrażonego, jako ważona chwilowa moc czynna i bierna odpowiednich harmoniczných składowych kolejności zerowej napięcia i prądu normalizowana sumą kwadratów amplitud harmoniczných napięcia z rozpatrywanego zakresu częstotliwościowego. Koncepcja kryterium w dalszych krokach wykorzystana jest do sformułowania postaci matematycznej decyzji chwilowej kryterium, będącej wynikiem uśrednienia dyskretnych w czasie kombinacji liniowych mocy czynnych i biernych podzielonej przez uśrednioną w tym samym interwale czasu sumę kwadratów amplitud składowej zerowej napięcia odniesionych do progu decyzji chwilowej. Do wyznaczenia mocy chwilowych oraz amplitud składowej zerowej napięcia wykorzystuje się wieloczęstotliwościowe filtry ortogonalne, których sygnałami wejściowymi są składowe zerowe prądu danej linii oraz napięcia w stacji rozdzielczej. W kolejnym etapie Doktorant przyjmuje funkcję celu, jako błąd średniokwadratowy pomiędzy docelowymi a chwilowymi (aktualnymi) decyzjami dla danego zestawu treningowego. W celu optymalizacji zdefiniowanej funkcji celu Doktorant posługuje się nieliniowym programowaniem matematycznym bez ograniczeń modyfikując w kolejnych etapach uczenia wartości wektora parametrów algorytmu decyzyjnego. Wektor parametrów zawiera, m.in. poszukiwane

wartości współczynników wagowych dwóch quasi-ortogonalnych filtrów cyfrowych oraz wartość progu decyzji chwilowej. Następnie, na podstawie przeprowadzonych uproszczeń sformułowanego kryterium quasi-admitancyjnego Doktorant otrzymuje wieloczęstotliwościowe kryteria: mocowe (bierno- i czynnomocowe) oraz konduktancyjne i susceptancyjne.

Rozdział siódmy stanowi interesujące, bogate i przejrzyste źródło wyników badań symulacyjnych jak i wynikających z nich wniosków cząstkowych. Na początku rozdziału Doktorant przytacza pojęcia związane z zabezpieczeniami elektroenergetycznymi a powiązane z niezawodnością pracy SEE, tj. pewność zabezpieczenia, bezpieczeństwo zabezpieczenia, niezawodność zabezpieczenia, selektywność zabezpieczenia, działania nieprawidłowe zabezpieczenia oraz brak zadziałania zabezpieczenia. Klasyfikuje również zamodelowane przypadki testowe doziemień ze względu na obecność lub brak błędów pomiarowych filtrów składowej zerowej prądu oraz zakłóceń harmonicznnych. Następnie Doktorant wykorzystując przebiegi prądowe i napięciowe uzyskane z modeli symulacyjnych opracowanych w programie EMTP, przeanalizował wszechstronnie zachowanie się opracowanych algorytmów dla różnych symulowanych zakłóceń, co pozwoliło na generację licznej populacji wyników i w efekcie na analizę statystyczną skuteczności wykrywania modelowych zwarć przez algorytmy dla różnego sposobu pracy punktu neutralnego sieci SN, długości okien filtrów ortogonalizujących i uśredniającego oraz różnej częstotliwości próbkowania. Działania te pozwoliły na wskazanie typu algorytmów kryterialnych i ich parametrów o najlepszej poprawności decyzyjnej dla danej sieci. Kolejny etap działań badawczych Doktoranta skupił się na ocenie porównawczej skuteczności działania opracowanych algorytmów (wytypowanych jako najbardziej skuteczne) z ich „klasycznymi” odpowiednikami. Przytoczone w pracy wyniki jednoznacznie wskazują na poprawę procesu decyzyjnego, szczególnie w sytuacjach zwarć nieliniowych. Również obecność zakłóceń w sygnałach wykorzystywanych przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe ma mniejszy wpływ na generowane decyzje w nowo opracowanych kryteriach. Treść rozdziału siódmego uzupełnia prezentacja graficzna i omówienie wybranych przypadków symulowanych zwarć doziemnych łącznie z reakcją algorytmów decyzyjnych na ich wystąpienie oraz analiza częstotliwościowa i interpretacja działania sformułowanych i wyselekcjonowanych przez Doktoranta kryteriów detekcji zwarć doziemnych.

Uzyskane i przedstawione w rozprawie wyniki potwierdzają wzrost skuteczności działania (rozumianej jako poprawność identyfikacji zakłócenia) wyselekcjonowanych algorytmów wieloczęstotliwościowych w stosunku do rozwiązań tradycyjnych, szczególnie w sytuacjach zakłóceń zwarciowych charakteryzującymi się występującymi nieliniowościami i dużą dynamiką w stanach nieustalonych.

Rozdział ósmy stanowi podsumowanie zagadnień i problemów ujętych w rozprawie.

Podsumowując można stwierdzić, że tekst rozprawy jest przykładem celowego, metodycznego i skutecznego działania Doktoranta. Jej treść obrazuje łatwość i swobodę działania Autora w zagadnieniach, m.in. modelowania elementów i wydzielonych struktur sieci dystrybucyjnej SN, układów pomiarowych i logicznych wykorzystywanych przez zabezpieczenia, roli i zadań elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej – zwłaszcza dedykowanej zwarciom doziemnym w sieciach SN, cyfrowego przetwarzania i filtracji sygnałów, algorytmów wieloczęstotliwościowych, formułowania kryteriów decyzyjnych, wykorzystania matematycznego programowania nieliniowego do optymalizacji opracowanych kryteriów decyzyjnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

W moim przekonaniu w rozprawie przyjęto i zastosowano odpowiednie metody naukowe i środki realizacji do rozwiązania postawionych problemów i wykazania jej tezy.

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

Wartość pracy obrazują dokonania Doktoranta zarówno w zakresie badań teoretycznych jak i symulacyjnych. Prawidłowe i efektywne wykorzystanie współczesnej wiedzy przy formułowaniu nowego wieloczęstotliwościowego kryterium quasi-

admitancyjnego wraz z jego uproszczeniami dla zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach SN o różnym sposobie pracy punktu neutralnego, wykorzystanie programowania nieliniowego bez ograniczeń do optymalizacji parametrów zdefiniowanych kryteriów zabezpieczeniowych, swoboda w opracowywaniu wielowariantowych modeli symulacyjnych zakłóceń w postaci zwarć doziemnych stanowią składniki wartościujące recenzowaną pracę. Na wartość pracy wskazują również bogate i wszechstronne badania symulacyjne pozwalające na statystyczną ocenę poprawności działania opracowanych algorytmów, wykazania w nich liderów oraz analizę porównawczą skuteczności decyzyjnej wyselekcjonowanych algorytmów w odniesieniu do ich odpowiedników „klasycznych”.

Moim zdaniem główne osiągnięcia Autora to:

- Logiczne i precyzyjne postawienie problemu badań, ich celu i tezy.
- Opracowanie modeli zwarć doziemnych dla sieci SN uwzględniających zwarcia łukowe (o stacjonarnych i niestacjonarnych parametrach), zwarcia łukowe przerywane, zwarcia metaliczne oraz zwarcia przez stacjonarną rezystancję liniową.
- Opracowanie zunifikowanego, cyfrowego modelu fragmentu sieci dystrybucyjnej SN o obieralnym sposobie pracy punktu neutralnego pozwalającego na symulacje z wykorzystaniem oprogramowania EMTP wielowariantowych zwarć doziemnych.
- Wykorzystanie powstałej bazy przebiegów do opracowania zbiorów treningowego oraz testowego następnie wykorzystywanych w procesie optymalizacji parametrów sformułowanych algorytmów oraz w analizie porównawczej „skuteczności działania” tych algorytmów w stosunku do ich odpowiedników „klasycznych”.
- Sformułowanie algorytmu decyzji chwilowej opartego na formule quasi-admitancyjnej będącej zgrubnym przybliżeniem skumulowanej admitancji dla składowej zerowej w rozpatrywanym przedziale częstotliwościowym.
- Wykorzystanie nieliniowego programowania bez ograniczeń do optymalizacji cech (parametrów) quasi-admitancyjnego kryterium ziemnozwarciowego.
- Opracowanie optymalizowanych, wieloczęstotliwościowych kryteriów: mocowych, konduktancyjnego i susceptancyjnego na bazie kryterium quasi-admitancyjnego.
- Przeprowadzenie szerokich, obejmujących zróżnicowane modele zakłóceń, badań symulacyjnych weryfikujących poprawność decyzyjną opracowanych algorytmów kryteriów ziemnozwarciowych; selekcja rozwiązań „optymalnych” dla danej sieci SN oraz przeprowadzenie analizy porównawczej skuteczności działania wyselekcjonowanych algorytmów wieloczęstotliwościowych i ich odpowiedników „klasycznych”.

## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W trakcie lektury treści pracy nasunęły się pewne uwagi i pytania zarówno o charakterze ogólnym jak i szczegółowym.

*Uwagi ogólne:*

1. Optymalizacja podstawowego kryterium quasi-admitancyjnego sprowadza się do wyznaczenia elementów wektora  $\mathbf{W}$  takich, aby zminimalizować przyjętą funkcję celu – zdefiniowaną, jako błąd średniokwadratowy między docelowymi a aktualnymi (chwilowymi) decyzjami generowanymi dla danego zestawu treningowego. Wektor  $\mathbf{W}$  zawiera wartości współczynników wagowych quasi-ortogonalnych pasmowych filtrów cyfrowych, współczynniki wagowe  $w_p$  i  $w_q$  oraz próg decyzji chwilowej  $w_0$ . W jaki sposób przyjmowano wartość decyzji docelowej oraz jak interpretować otrzymane w wyniku optymalizacji różne wartości progów decyzji chwilowej  $w_0$ ?
2. Dlaczego wartość współczynnika  $w_q$  kryterium  $d_B$  jest ujemna dla sieci z punktem neutralnym izolowanym (rys. 7.22) zaś dodatnia dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez cewkę Petersena (rys. 7.24)?
3. Otrzymane w wyniku optymalizacji parametry funkcji kryterialnej (wartości wektora  $\mathbf{W}$ ) są wynikiem procesu treningowego i testowego na bazie przebiegów symulacyjnych

różnych typów i postaci zwarć doziemnych w modelowanej strukturze sieciowej. Czy uzyskane w ten sposób parametry algorytmów realizujących różne kryteria decyzyjne zabezpieczeń ziemnozwarciowych mają charakter uniwersalny, tj. czy algorytmy o takich parametrach mogą zostać skutecznie wykorzystane w dowolnej strukturze sieci SN, czy też są dedykowane danej strukturze na bazie której powstały wzorce treningowe i testowe?

4. Odnosi się wrażenie, że w przyjętej metodzie optymalizacji (zmodyfikowany algorytm Levenberga-Marquardta) istotnym czynnikiem mającym duży wpływ, na jakość uzyskanego rezultatu, tj. sparametryzowanego algorytmu decyzyjnego ma reprezentatywność przebiegów uczących (treningowych) i testujących. Czy przygotowując zestawy symulowanych zwarć doziemnych uwzględniono ten warunek?
5. Czy proponując metodę optymalizacji chwilowego kryterium decyzyjnego, rozważano wykorzystanie innych algorytmów w optymalizacyjnych, np. pozwalających wprowadzić ograniczenia dotyczące warunków ortogonalności dla filtrów nierekursywnych?
6. Z czego wynika znaczna rozbieżność pomiędzy wynikami uzyskanymi dla kryterium mocowego  $d_Q$  (tablica 7.5 i 7.6) oraz  $d_{PQ}$  (tablica 7.7 i 7.8) a kryterium susceptancyjnym  $d_B$  (tablica 7.11 i 7.12) oraz admitancyjnym  $d_{GB}$  (tablica 7.13 i 7.14)? Analitycznie, kryteria te różnią się jedynie mianownikiem równania 6.47, tj. uśrednioną sumą kwadratów quasi-amplitud harmonicznich składowej zerowej napięcia. Należy również zaznaczyć, że przytoczona „suma kwadratów amplitud” jest zależna od widma amplitudowego uzyskanych filtrów quasi-ortogonalnych, decydujące o tym które składowe częstotliwościowe i w jaki sposób są „przepuszczane”.
7. Z treści pracy wynika (por. str. 40), że przy modelowaniu zakłóceń harmonicznich uwzględniono 16 pierwszych harmonicznich. Czy wybierając taki model zakłóceń brano pod uwagę częstotliwość odcięcia filtra antyaliasingowego zabezpieczenia? Ile ona wynosiła i jak przekłada się ta częstotliwość do modelowanego widma zakłóceń? Brak odcięcia dolnopasmowego przy modelowanym widmie sygnału pomiarowego i częstotliwości próbkowania 1 kHz wywoła efekt aliasingu w reprezentatywnym sygnale dyskretnym.
8. Dla sieci SN o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor Doktorant rekomenduje do dalszych badań kryterium konduktancyjne  $d_G$  dla częstotliwości próbkowania  $f_p=2$  kHz oraz parametrach  $N_f=80$  i  $N_{sr}=80$ . Analogiczne rezultaty otrzymuje się dla algorytmu admitancyjnego  $d_{GB}$  przy 2-krotnie mniejszych wartościach  $f_p$ ,  $N_f=40$  i  $N_{sr}=40$  (por. tablica 7.27) a więc o dwukrotnie lepszej dynamice rozumianej, jako szybkość uzyskania stabilnej odpowiedzi przy nagłej zmianie sygnału wejściowego. Wydaje się, że jedynym mankamentem tego algorytmu są bardziej złożone obliczenia. Proszę o komentarz.
9. Na stronie 8 rozprawy Doktorant pisze: „Przedłożona rozprawa poświęcona jest nowej metodzie detekcji zwarć niskorezystancyjnych w sieciach rozdzielczych o różnym sposobie uziemienia punktu neutralnego.” Jakie zwarcia doziemne traktowane są w pracy jako niskorezystancyjne?

#### Uwagi szczegółowe:

1. Na str. 52 Doktorant pisze: „ $N_{sr}$  jest długością okna filtra uśredniającego”, „ $N_f$  jest długością okna wieloczęstotliwościowych filtrów ortogonalnych”.  $N_{sr}$  oraz  $N_f$  jest liczbą współczynników wagowych filtrów ortogonalnych w ich oknach pomiarowych lub liczbą próbek sygnału uśrednianego w oknie pomiarowym. Długości te wynoszą odpowiednio:  $TN_{sr} = N_{sr}T_p$ ,  $TN_f = N_fT_p$ , gdzie  $T_p$  jest okresem próbkowania.
2. Na str. 54 napisano: „... należy wyeliminować wszystkie składniki (6.33) z wyjątkiem składowych stałych. W związku z tym należy wynik (6.33) poddać filtracji dolnoprzepustowej. Wydaje się, że najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie pełnookresowego okna filtra w postaci funkcji Walsha zerowego rzędu, który jest w zasadzie filtrem uśredniającym.” Filtry Walsha „0” rzędu o  $T_w=T_1$  oraz  $T_w=2T_1$  zaproponowane w pracy nie spełniają wymagań co do „eliminacji wszystkich składników z wyjątkiem składowych stałych”. Są to filtry dolnoprzepustowe eliminujące składowe



harmoniczne. Ponadto odnosi się wrażenie, że na rys. 6.8 przedstawiono unormowane widma tych filtrów, które w rzeczywistości wzmacniają składową stałą oraz składowe niskoczęstotliwościowe zawarte w sygnale wejściowym. Ze względu na brak w pracy przykładowych widm amplitudowych sygnałów treningowych, trudno odnieść się do kwestii czy zawierają one jedynie harmoniczne i interharmoniczne.

3. Dlaczego dla wyników zawartych w tabeli 7.1. i 7.2 liczba współczynników  $N_f=41, 61, 81, 121$  zaś dla pozostałych wartości te są pomniejszone o 1?
4. Na jakiej podstawie Doktorant twierdzi, że: „Jeżeli nawet można by doszukać się w tych danych niewielkiej poprawy takiego kryterium, bo raczej nie pogorszenia ...” (str. 67). Na podstawie danych zawartych w tabelach 7.11 – 7.14 odnosi się wrażenie, że niewielka poprawa jest widoczna jedynie dla  $f_p=1$  kHz,  $N_f=60$  oraz  $N_{sr}=60$ .
5. Na stronie 70 napisano „... i długości okien filtracyjnych  $N_f=80$  i  $N_{sr}=80$  poziomy błędów są zerowe.”. Jak już wspomniano w uwadze 1 współczynniki lub parametry  $N_f$  oraz  $N_{sr}$  nie są długościami okien filtracyjnych.
6. Na stronie 75 Doktorant pisze: „Trudny do wytłumaczenia jest natomiast brak poprawy skuteczności kryterium mieszanego  $d_{GB}$ , a nawet zauważalny problem z osiągnięciem skuteczności klasyfikacji ...”. Na podstawie wyników przedstawionych w tabelach 7.37 – 7.42 można stwierdzić znaczną poprawę działania algorytmu  $d_{GB}$ , w zakresie zmniejszenia błędnych działań nadmiarowych, zwłaszcza dla  $f_p=2$  kHz.
7. Z opisu zamieszczonego na str.87 wynika, że rys. 7.10 i 7.11 przedstawiają przebieg procesu decyzyjnego dla linii zdrowej L4 podczas zwarcia doziemnego w linii L1. Natomiast podpis pod rys. 7.10 mówi o sygnałach w linii L1 podczas stabilnego zwarcia łukowego na końcu linii L2.
8. Przy zwarcich przerywanych, zwłaszcza w sieci z izolowanym punktem neutralnym (por. rys. 7.9e) przebieg procesu decyzyjnego według reguły  $t(B>U_0)>100$  ms generuje sygnał decyzyjny „wysoki” w krótkich (około 30 ms) interwałach czasowych. Jakże może to wywołać potencjalne reperkusje w procesie wyłączenia takiego zwarcia przez wyłącznik o dłuższym czasie własnym wyłączenia?
9. Z przedstawionych widm amplitudowych i fazowych dla kryterium  $d_B$  w przypadku sieci SN pracującej z izolowanym punktem neutralnym (por. rys. 7.22) wynika praktyczna eliminacja z procesu decyzyjnego harmonicznych niskich rzędów od 1 do 5, których zawartość w sygnale pomiarowym powinna być relatywnie duża a więc dla wyeksponowania silnej decyzji ich udział powinien być znaczący. Również trudno dla tych składowych dostrzec spełnienie warunku ortogonalności. Powstaje, zatem wątpliwość na ile uzyskane w procesie optymalizacyjnym filtry sformułowanych kryteriów decyzyjnych spełniają założenia wieloczęstotliwościowego kryterium quasi-admitancyjnego i jego uproszczeń (kryterium konduktancyjne, susceptancyjne, mocowe)?

Pragnę podkreślić, że powyższe uwagi i wątpliwości mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości recenzowanej pracy.

Także poziom edytorski pracy jest dobry. Pewne zastrzeżenia budzi czytelność (rozdzielczość) niektórych rysunków, fragmenty analizy uzyskanych wyników oraz wymienione w uwagach użyte sformułowania. Pojawiają się również pewne przeoczenia czy błędy edytorskie, np.:

1. str. 7: „jest  $0I_{cs}$  pojemnościowy prąd zwarcia (...)”. Powinno być  $I_{cs}$  (...).
2. str. 10: jest „ (...) nie są wykrywane przez ko2nwencjonalne zabezpieczenia (...)”. Powinno być nie są wykrywane przez konwencjonalne zabezpieczenia .
- 3.
4. str. 22: jest „Nie istnieje uniwersalne zabezpieczenie od zwarć doziemnych (...)”. Powinno być od skutków zwarć doziemnych lub ograniczające skutki zwarć doziemnych.
5. str. 25: w równaniu (4.2) prądy fazowe oznaczone jako  $I_a, I_b, I_c$ , powinno być  $I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}$ .
6. str. 29: jest „(...) podano w Tablicy 1, gdzie  $I_{oi}$  (...)”. W tablicy 1 nie ma prądu  $I_{oi}$ .

7. str. 31: jest „Zastosowanie kryterium susceptancyjnego, i to tylko w wersji kierunkowej  $G_{0k} > (\dots)$ ”. Powinno być  $B_{0k} >$ .
8. str. 34: w równaniu (4.28) jest  $j \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \text{Im}[Y_{0sum}(i)]j$ , powinno być  $j \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \text{Im}[Y_{0sum}(i)]$ .
9. str. 38: jest „(...) dostępną w środowisku graficzny ATPDraw dla programu EMTP. Linie i kable w LCC modelowaną są (...). Powinno być w środowisku graficznym ATPDraw dla programu EMTP. Linie i kable w LCC modelowane są.
10. str. 41: jest „(...) zwarcie metaliczne przez statyczną rezystancje (...). Powinno być zwarcie metaliczne przez statyczną rezystancję.
11. str. 41: jest „(...) gdzie  $g(t)$  jest konduktancją łuku dynamicznego,  $G(t)$  konduktancją łuku statycznego (...)”. W równaniu (5.2) którego opis dotyczy przytoczona treść występują wielkości  $g(s)$  oraz  $G(s)$ .
12. str. 42: jest „(...) został zaprogramowany w srokowsku MODELS (...). Powinno być został zaprogramowany w środowisku MODELS .
13. str. 53: jest „(...) gdzie  $w_{m+1}$ ,  $w_m$  są zestawami współczynników odpowiednio przed i po modyfikacji (...)”. Powinno być odpowiednio po i przed modyfikacją.
14. str. 68: jest „(...) transformata Hilberta stosowana jest do przewodzenia przesunięcia fazowego (...). Powinno być do wprowadzenia przesunięcia fazowego.
15. str. 83-84: rysunki 7.4, 7.5 i 7.6 zostały umieszczone w pracy przed powołaniem się na nie w jej treści.
16. str. 84: jest „(...) poddano również próbom dla tak niekorzystnym warunkom doziemienia.” Powinno być dla tak niekorzystnych warunków doziemienia.
17. str. 86: brak powołania w treści pracy na rys. 7.9.
18. str. 95: podpis pod rys. 7.24 jest „(...) uziemionym cewkę Petersena (...)”. Powinno być uziemionym przez cewkę Petersena.
19. str. 98: jest „(...) służą do bezpośredniego wytwarzania, przesyła i rozdziału energii elektrycznej.” Powinno być do bezpośredniego wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej.

## 6. Wnioski końcowe

Zaprezentowane w pracy wieloczęstotliwościowe algorytmy kryteriów decyzyjnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych dedykowanych sieciom SN, opracowanie modelu symulacyjnego sieci SN, przeprowadzenie wielowariantowych badań symulacyjnych oraz analiza uzyskanych wyników potwierdzają zdolności naukowe i umiejętności badawcze Doktoranta. Doktorant rozwiązał poprawnie sformułowany problem naukowy. Za pomocą dostępnych, nowoczesnych metod naukowych i badawczych udowodnił postawioną przez siebie tezę.

6.1 Na podstawie lektury przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej i analizy jej treści stwierdzam, że recenzowana praca spełnia kryteria oraz wymogi stawiane rozprawom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym ... (tekst jednolity Dz. U. 2017) oraz w towarzyszących jej aktach prawnych **w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika**, określonej w rozporządzeniu MNiSW z 2019 r., której zakres obejmuje dotychczasową dyscyplinę Elektrotechnika, zapisaną w Rozporządzeniu MNiSW z 2011 r.

6.2 Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

*Handwritten signature*