



dr hab. inż. Jacek Klucznik, prof. uczelni  
Katedra Elektroenergetyki

17.06.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Łukaszewskiego  
pt.: „Zastosowanie metody pęku macierzy do klasyfikacji i lokalizacji zwarć w sieciach  
dystrybucyjnych na podstawie analizy fal wędrownych”**

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Łukasz Nogal, prof. PW

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Łukaszewskiego zatytułowanej „Zastosowanie metody pęku macierzy do klasyfikacji i lokalizacji zwarć w sieciach dystrybucyjnych na podstawie analizy fal wędrownych”, została przygotowana na podstawie uchwały nr 733/III/2024 r Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, z dnia 16 kwietnia 2024 r.

## **I Ocena ogólna pracy**

### **1. Ocena układu rozprawy doktorskiej**

Pracę rozpoczyna streszczenie przygotowane w języku polskim i angielskim. Następnie umieszczono spis treści. Zasadniczą treść pracy zawarto w siedmiu rozdziałach obejmujących łącznie 157 stron. Po zasadniczej treści pracy Doktorant umieścił załączniki oznaczone literami od A do F. Na końcu pracy umieszczony jest wykaz literatury.

Pierwszy rozdział pracy zawiera wprowadzenie do problematyki lokalizacji zwarć. Zawarty jest tu ogólny przegląd literatury odnoszącej się do tematyki poruszanej w rozprawie. W oparciu o wskazane mankamenty metod lokalizacji zwarć zawartych w komentowanych publikacjach w rozdziale przedstawiana jest teza pracy.

W rozdziale drugim przedstawiono problematykę modelowania napowietrznych linii elektroenergetycznych pod kątem analizy zjawisk falowych. Porównano tu dwa sposoby modelowania linii: z wykorzystaniem funkcji programu Matlab (opartej faktycznie o równania Carlsona) oraz z wykorzystaniem modelu D'Amore. Dla przykładowych linii WN i SN porównano uzyskane impedancje oraz admitancji obu modeli. Porównano też charakterystyki częstotliwościowe tłumienia oraz prędkości fazowe fal wędrownych uzyskane dla obu modeli.

W rozdziale trzecim, który uważam za interesujący i bardzo wartościowy, Doktorant zajął się problematyką transformacji sygnałów falowych przez przetworniki pomiarowe. W rozdziale prezentowane są wyniki testów laboratoryjnych przeprowadzonych przez Doktoranta dla różnych typów konwencjonalnych i niekonwencjonalnych przekładników prądowych i napięciowych. Doktorant zmierzył charakterystyki przenoszenia przekładników i na tej podstawie opracował modele transmitancyjne poszczególnych układów.

Rozdział czwarty jest poświęcony opracowaniu algorytmu wykrywania impulsów falowych. Na podstawie innych zastosowań metody pęku macierzy w dziedzinie elektroenergetyki opisywanych w literaturze, Doktorant przedstawia najpierw matematyczne podstawy metody, prezentuje jej działanie na przebiegach (funkcjach) testowych, następnie przedstawia kompletny algorytm wykrywania impulsów pochodzących od fal wędrujących. Dalsza część rozdziału jest poświęcona wielowariantowym testom opracowanej metody na trzydziestoczętery węzłowym modelu sieci SN oraz na uproszczonym modelu sieci WN.

W rozdziale kolejnym poszukiwana jest metoda klasyfikacji zwarcia oparta na pomiarze wartości napięcia przed zwarcie i amplitudy czoła pierwszej fali zwarciowej przybyłej do sensora napięciowego. Autor zaprezentował opracowane przez siebie algorytmy klasyfikacji rodzaju zwarcia na podstawie pomiarze amplitudy czoła fali zwarciowej oraz wyniki przeprowadzonych testów dla sieci SN i WN. W rozdziale czytelnik znajdzie również szczegółowe zastawienie tabelaryczne błędów analizowanych metod.

W rozdziale szóstym przedstawiono wykorzystanie pęku macierzy do lokalizacji zwarć. Pierwsza część rozdziału zawiera przykład zastosowania opracowanego algorytmu do lokalizacji zwarć w sieci wysokiego napięcia. W drugiej części przedstawiono propozycje algorytmów lokalizacji zwarć w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia. Prezentację metod poprzedzono analizą propagacji faz w sieciach dystrybucyjnych będącą podstawą do opracowania metod lokalizacji zwarć. Rozdział kończą rozważania na temat perspektyw dalszych prac badawczych.

Ostatni rozdział zasadniczej części pracy zawiera podsumowanie wykonanych prac, w tym wyszczególnienie wkładu własnego Autora.

Załączniki do pracy zawierają dane modelowanych linii napowietrznych, dane modeli sieci wykorzystywanych w analizach, parametry modeli transmitancyjnych przetworników pomiarowych średnich napięć i rozszerzone wyniki lokalizacji zwarć w sieci średniego napięcia.

## **2. Ocena doboru literatury**

Literatura wymieniona w spisie obejmuje 174 pozycje, w tym publikacje naukowe polsko i angielskojęzyczne, standardy i dokumentacje techniczne oraz materiały z witryn internetowych. W kwestii aktualności literatury można zauważyć, że Doktorant prezentuje literaturę od roku 1983 do chwili obecnej, ale znakomita większość cytowanych publikacji obejmuje ostatnie 10 lat. Uważam, że literatura prezentowana w wykazie została dobrana właściwie.

## **3. Ocena celu pracy**

Doktorant postawił w pracy następującą tezę: *„Możliwe jest opracowanie algorytmów klasyfikacji i lokalizacji zwarć w sieciach dystrybucyjnych opartych na pomiarze sygnałów elektrycznych fal wędrownych w jednym punkcie sieci i niewymagających pełnych obliczeń symulacyjnych elektromagnetycznych stanów przejściowych. Do wykonania tych algorytmów można wykorzystać metodę pęku macierzy.”*

Celem pracy postawionym przez Doktoranta jest zatem opracowanie algorytmu pozwalającego w sposób pewny zidentyfikować rodzaj zwarcia jaki powstał w sieci i określić jego lokalizację. Dodatkowo, co nie jest zawarte w tezie, ale jest istotne dla wykonanej pracy Doktorant zauważa, że część autorów prac w podjętej tematyce pomija wpływ przetworników pomiarowych na wyniki działań algorytmów, zakładając doskonały pomiar sygnałów pierwotnych. Doktorant zatem stawia sobie cel dodatkowy, jakim jest ocena wpływu przekształtników pomiarowych na funkcjonowanie algorytmów lokalizacji. Cel ten ostatecznie zaowocuje opracowaniem modeli transmitancyjnych wybranych typów przetworników.

Zważywszy na obecny stan wiedzy oraz potrzeby operatorów sieci elektroenergetycznych (co analizowane będzie szerzej w punkcie 6 recenzji), uznaję że teza i cel pracy zostały sformułowane właściwie.

Warto podkreślić jeszcze przed analizą i oceną całej pracy, że potencjalne wyniki i metody prezentowane w rozprawie mogą mieć charakter aplikacyjny i niewątpliwie mogą wzbudzić zainteresowanie Operatorów sieci, którzy odpowiedzialni są za efektywną i bezpieczną pracę swoich instalacji.

#### **4. Ocena zastosowanych metod badawczych**

Recenzowana rozprawa opiera się o zaawansowany aparat matematyczny wykorzystywany w celu rozwiązania postawionego problemu. W ogólności w pracy można wyróżnić trzy obszary metod badawczych. Są to pomiary laboratoryjne wykonane w związku z oceną działania przetworników pomiarowych. Są to symulacje w dziedzinie czasu, wykonywane z wykorzystaniem środowiska Matlab/Simulink. Przede wszystkim są to jednak procedury matematyczne związane z przetwarzaniem danych pomiarowych. Doktorant z powodzeniem wdrożył i rozwinął metody związane z przetwarzaniem sygnału pomiarowego z zastosowaniem pęku macierzy. Uważam, że zastosowane metody są właściwe dla analizowanego problemu.

Ponadto, uważam za cenne i rozwojowe dla Doktoranta zastosowanie połączenia tych trzech obszarów badań, tj.: pomiarów, symulacji i przetwarzania sygnałów.

Dodatkowe uwagi związane ze sposobem prowadzenia analiz zawarto w rozdziale recenzji II Szczegółowa ocena pracy.

#### **5. Ocena sposobu omówienia wyników przeprowadzonych badawczych**

Praca napisana jest na bardzo dobrym poziomie językowym. Zachowane są zasady ortografii, gramatyki i interpunkcji. W pracy zdarzają się co prawda zdania, lub sformułowania, które można by skonstruować inaczej, aby polepszyć jakość przekazu, ale nie utrudniają one istotnie odbioru pracy.

Strona graficzna pracy jest wykonana również na dobrym poziomie. Prezentowane rysunki, schematy są czytelne i poprawnie opisane. Odwołania do rysunków i tabel w tekście pracy zrobione są prawidłowo. Również odwołania do literatury i jej spis zrobione są właściwie. Zauważone, najistotniejsze uchybienia w zakresie języka i strony edycyjnej pracy zawarto w rozdziale II recenzji. Są one dość ograniczone, co świadczy o jej dobrym poziomie redakcyjnym.

#### **6. Ocena praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań**

Szybka i dokładna lokalizacja miejsca wystąpienia zwarcia jest niezmiernie ważna dla operatorów sieci dystrybucyjnych i sieci przesyłowych. Pozwala ona na skrócenie czasu dotarcia służb technicznych do miejsca zwarcia, szybsze podjęcie działań naprawczych i przyspieszenie przywrócenia zasilania. Problem ten jest coraz istotniejszy w ostatnich latach z powodu starzenia się infrastruktury sieciowej i zwiększającej się liczby awarii w sieciach. Ponadto spółki dystrybucyjne zobowiązane są do utrzymania wskaźników określających czasy przerw w dostawach energii (SAIDI, SAIFI, MAIFI) na odpowiednio niskim poziomie. Szybsza likwidacja skutków zwarć przyczynia się do zmniejszenia tych wskaźników. Dlatego uważam, że podjęte przez Doktoranta działania są właściwe i potrzebne dla lepszego funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.

Trzeba jednak zauważyć, że od opracowanych w rozprawie metod do praktycznej ich implementacji w postaci urządzenia, jakie można będzie w praktyce zastosować w sieci jest (może być) bardzo długa droga. Związane jest to z niejednoznacznością i niepewnością uzyskiwanych wyników.

Tym niemniej uważam, że zaproponowana metoda lokalizowania zwarć ma duży potencjał praktyczny i powinna być dalej rozwijana. Kolejnym etapem działań powinno być rozpoczęcie współpracy z wybraną spółką dystrybucyjną i pozyskanie wyników pomiarów przebiegów falowych przy zwarciach z rzeczywistej sieci. Taki zbiór pomiarów, uzupełniony o raporty dotyczące lokalizacji zwarć jakie wystąpiły, pozwoliłby na ocenę metody w warunkach dużo bliższych rzeczywistości niż zrobiono to w rozprawie.

## **7. Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego**

W mojej opinii samodzielnym i oryginalnym osiągnięciem Doktoranta są:

1. Badania laboratoryjne charakterystyk przenoszenia przetworników pomiarowych SN i opracowanie modeli transmitancyjnych tych układów,
2. Modyfikacja metody pęku macierzy w celu wykorzystanie jej w algorytmach klasyfikacji i lokalizacji zwarć,
3. Opracowanie metody pomiaru amplitudy impulsu przy znajomości czasu jego przybycia,
4. Opracowanie algorytmu klasyfikacji rodzaju zwarcia z wykorzystaniem pomiaru napięcia przed zwarcie i pomiaru amplitudy czoła pierwszej fali zwarciowej,
5. Opracowanie algorytmu analizy grafu sieci rozgałęzionej w celu wyszukiwania analizy tras propagacji fal zwarciowych,
6. Opracowanie dwóch metod lokalizacji zwarć w sieciach średniego napięcia z wykorzystaniem pomiaru tylko w jednym punkcie sieci,

Recenzowana praca nie odbiega od standardów w literaturze światowej pod względem stosowanych metod i technik obliczeniowych.

W mojej ocenie rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego mieszczącego się w dyscyplinie, w której Kandydat ubiega się o nadanie stopnia naukowego.

## II Szczegółowa ocena pracy

### 1. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

1.1. Autor stwierdził, że „Proponowana metoda klasyfikacji zwarć opiera się na porównaniu zmierzonych w dowolnym punkcie sieci amplitud modów fali zwarciowej z przewidywanymi amplitudami dla założonej z góry klasy zwarć.” Sieci dystrybucyjne SN często podlegają rekonfiguracji za pomocą instalowanych w głębi sieci wyłączników sterowanych zdalnie (tzw. recloserów). Jak w takiej sytuacji zachowa się lokalizator oparty o algorytmy proponowane przez Dyplomanta?

1.2. W pracy rozważano wyłącznie linie napowietrzne, o takich samych parametrach dla całej sieci. Jest to moim zdaniem zbyt teoretyczne podejście. Jak zachowa się metoda jeżeli zmieni się przekrój przewodów lub układ przewodów na słupach (np. z płaskiego na trójkątny)? Dodatkowo obecnie prawie nie spotyka się sieci SN zawierających wyłącznie linie napowietrzne. Nawet w przypadku sieci położonej na terenach o niskiej gęstości zabudowy coraz częściej pojawiają się odcinki kablowe (stosowane np. przy kolizji linii z ważniejszymi drogami czy na obszarach leśnych). Jak obecność odcinków kablowych wpłynie na działanie algorytmu lokalizacji zwarć?

1.3. W rozdziale 5 prezentowane są wyniki dokładności działania algorytmów. Miarą oceny jest błąd definiowany jako „jako stosunek procentowy liczby poprawnych klasyfikacji danego typu problemu do wszystkich zwarć danego typu” (str. 118). W takiej sytuacji im większa wartość „błędu” tym dokładniejsza staje się metoda. Chyba nie taki był zamysł Autora. Taka definicja „błędu” nie koresponduje z dalszym opisem wyników analiz.

1.4 Jak wyjaśnić mniejsze błędy dla zwarć ulokowanych w fazie środkowej (L2-E) niż dla fazy skrajnej (L1-E)? Różnice między błędami są znaczące (np. Tab. 5.1).

1.5 Doktorant przyjął tytule rozprawy, że będzie się zajmować klasyfikacją i lokalizacją zwarć w sieciach dystrybucyjnych. Jaki jest zatem cel analiz linii i fragmentu sieci o napięciu znamionowym, 220 kV? W celu udowodnienia, że przy prostej, nierozgałęzionej strukturze sieci łatwiej jest zidentyfikować rodzaj zwarcia i określić jego lokalizację, można było zrealizować wykorzystując skrajnie uproszczoną sieć SN. Uważam, że praca jest na tyle rozbudowana, że wplatanie w rozważania linii NN nie było uzasadnione.

1.6 Sposób podawania parametrów modeli transformatorów (Załącznik D) budzi wątpliwości. Z jednej strony mieszane są dwie konwencje – Doktorant podaje napięcie zwarcia i straty obciążeniowe (parametry z tabliczki znamionowej) oraz rezystancję i indukcyjność magnesowania (parametry obliczone). Mało tego podane wartości rezystancji i indukcyjności nie pasują do wartości typowych (oczekiwanych). Dla podanych w załączniku wartości, dla transformatora o mocy 0,63 MVA (przyjmując, że podane wartości rezystancji i reaktancji odniesiono do napięcia 15,75 kV), uzyskuje się straty jałowe na poziomie 76 W (czyli bardzo małe) oraz prąd biegu jałowego na poziomie 14% (czyli o wiele za dużo).

1.7 Podobna uwaga dotyczy zastępczego systemu elektroenergetycznego (Załącznik D.3) Dlaczego pominięto reaktancję systemu? Jakiej mocy zwarciowej odpowiada przyjęta wartość rezystancji? Czy jest to wartość realistyczna, spotykana w typowych stacjach 110 kV?

## 2. Uwagi o charakterze redakcyjnym

2.1. Brak jest w pracy wykazu stosowanych skrótów i oznaczeń. Przy pracy zawierającej tak obszerne rozważania matematyczne uważam to za konieczność.

2.2. Linie napowietrzne, a nie „powietrzne” (str. 15)

2.3 „Prewencja zwarciowa” (str. 19) jest dla mnie egzotycznym określeniem.

2.4 Zamiast określenia „gleba” (str. 23), właściwszym w kontekście pracy, jest określenie grunt.

2.5 Nieprecyzyjny opis wielkości w równaniu (2.86)  $Z_{ph}$ ,  $Z_g$  są macierzami impedancji własnych i wzajemnych układu przewodów fazowych i układu przewodów odgromowych.  $Z_{pg}$  i  $Z_{gp}$  to też macierze impedancji.

2.6. Jestem przeciwnikiem używania zwrotu „moment” w odniesieniu do czasu w tekstach technicznych. Za lepszy zwrot uważam „chwila”.

2.7 Co to są układy n-fazowe (str. 104)? Czy spotykamy w sieciach przesyłowych lub dystrybucyjnych układy liczbie faz innej niż 3?

2.8. Czy w zwrocie „wzmocnienie pulsu napięcia” (str. 122) chodziło o „impuls”?

2.9 Zdanie „Prezentację metod poprzedzono analizą propagacji faz w sieciach dystrybucyjnych prowadzącą do ich opracowania.” (str. 134) jest dla mnie niezrozumiałe.

### III Podsumowanie i wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z recenzowaną rozprawą, z pełnym przekonaniem, mogę stwierdzić, że:

- Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Piotra Łukaszewskiego podejmuje ważny i aktualny temat badawczy.
- Praca jednoznacznie kwalifikuje się do dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.
- Doktorant osiągnął postawiony cel pracy stosując oryginalne metody naukowe.
- Doktorant dysponuje odpowiednią wiedzą teoretyczną w zakresie dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

W związku z powyższym stwierdzam, że: **praca spełnia wymagania dotyczące prac doktorskich w odniesieniu do oryginalności rozwiązania problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej z dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne zgodnie z art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. 2022 poz. 574, z późniejszymi zmianami).**

Wnoszę o dopuszczenie rozprawy Pana mgr. inż. Piotra Łukaszewskiego do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.



