

Prof. dr hab. inż. Tomasz BOCZAR
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława ROGALSKIEGO
pt. „*Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej stosowanej*
w transformatorach z wykorzystaniem modelu skokowej wymiany
ładunków”

Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Lubelskiej prof. dra hab. inż. Piotra Kisały z dnia 8 sierpnia 2023 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Paweł Żukowski, prof. uczelni.

1. Ocena aktualności podjętej tematyki

Konkurencyjny rynek energii elektrycznej stawia przed koncernami energetycznymi oraz spółkami dystrybucyjnymi coraz większe wymagania dotyczące niezawodności i ciągłości pracy urządzeń wchodzących w skład systemu elektroenergetycznego. W szczególności dotyczy to transformatorów dużych mocy, których koszt wytworzenia należy do największych, a ich awarie powodują znaczne straty finansowe związane nie tylko z kosztem ewentualnej naprawy samej jednostki, lecz także z przerwą w dostawach energii elektrycznej do użytkowników. Przy czym, istotnym aspektem jest znaczący udział w populacji eksploatowanych obecnie transformatorów, jednostek których wynikający z dokumentacji technicznej okres eksploatacji się już zakończył. Jednocześnie do jednej z głównych przyczyn awarii transformatorów energetycznych można zaliczyć utratę własności izolacyjnych lub odpowiednio trwałe uszkodzenie układu izolacyjnego. Dlatego w ostatnich latach zauważalny jest dynamiczny rozwój metod diagnostycznych oraz układów kontrolujących pracę transformatorów, przede wszystkim nieniszczących, które umożliwiają ocenę stanu układów izolacyjnych, podczas ich normalnej eksploatacji w warunkach przemysłowych, a także w ramach przeprowadzanych okresowo przeglądów technicznych.

Jednym z podstawowych czynników, mających wymierny wpływ na proces starzenia się i tym samym decydującym o czasie życia izolacji papierowo-olejowej, która jest najczęściej wykorzystywana w transformatorach elektroenergetycznych, jest jej zawilgocenie. Obecnie w badaniach diagnostycznych umożliwiających dokonanie oceny ilościowej stopnia zawilgocenia izolacji transformatorów wykorzystywane są najczęściej metody nieinwazyjne, które bazują głównie na wynikach pomiarów wielkości elektrycznych. W tym zakresie stosowane są standardowo metody wykorzystujące rezultaty uzyskiwane w dziedzinie czasu (metoda PDC ang. Polarization Depolarization Current; RVM ang. Return

Voltage Measurement), a także częstotliwości (metoda FDS ang. Frequency Domain Spectroscopy). Aby możliwe było określenie zawartości wilgoci w izolacji papierowo-olejowej konieczna jest znajomość wzorcowych charakterystyk jej parametrów elektrycznych, które pozyskiwane są na podstawie badań realizowanych w warunkach laboratoryjnych. Należy, przy tym zauważyć, że wykorzystywane aktualnie sposoby przygotowywania próbek pomiarowych izolacji o znanym stopniu zawilgocenia, które są niezbędne do wykonywania pomiarów laboratoryjnych, mogą w istotnym stopniu odbiegać od zjawisk fizyko-chemicznych i elektrycznych, zachodzących w eksploatowanych transformatorach. Dodatkowo, ważnym zagadnieniem jest opracowanie tego typu charakterystyk dla próbek o krytycznym, z punktu widzenia zachowania własności izolacyjnych, poziomie zawilgocenia równym 5% wag. Należy również mieć na uwadze, że rozpuszczalność wody w oleju izolacyjnym jest ściśle powiązana ze zmianami temperatury, jak również wpływa na proces wymiany wilgoci między izolacją stałą, a ciekłą.

Rozwiązaniu wyżej wymienionych problemów o charakterze naukowo-badawczym oraz natury technicznej poświęcona jest recenzowana rozprawa doktorska. W szczególności ogólnym celem poznawczym pracy doktorskiej mgra inż. Przemysława Rogalskiego było przeprowadzenie kompleksowych badań eksperymentalnych, a następnie analiz uzyskanych wyników pod kątem oceny możliwości i zakresu zastosowania zaproponowanych przez Niego nowych metod nawilżania składowych izolacji papierowo-olejowej transformatorów elektroenergetycznych, dla potrzeb przygotowywania ich próbek wzorcowych. Zaproponowane sposoby odzwierciedlają procesy fizyko-chemiczne zachodzące w pracujących układach izolacyjnych jednostek transformatorowych. Przy czym, należy podkreślić, że prace badawcze dotyczyły wyznaczenia wzorcowych częstotliwościowo-temperaturowych charakterystyk parametrów elektrycznych wysuszonego próżniowo, a następnie zimpregnowanego olejem izolacyjnym preszpanu nawilżonego do poziomu krytycznego oraz oleju mineralnego, który został nawilżony na drodze dyfuzji wilgoci z impregnowanego preszpanu o zawartości krytycznej wilgoci ($5,0 \pm 0,2$) % wag.

Reasumując, moim zdaniem podjęta w rozprawie tematyka, założone cele i zdefiniowana teza badawcza, są aktualne i ważne, zarówno pod względem naukowym, jak również mają silnie zaznaczony potencjał aplikacyjny. Należy podkreślić, że uzyskane w ramach realizacji pracy doktorskiej rezultaty związane z opracowaniem nowych metod nawilżania impregnowanego preszpanu oraz oleju izolacyjnego mają duże znaczenie poznawcze oraz mogą znaleźć zastosowanie praktyczne w procesie przygotowywania wzorcowych charakterystyk częstotliwościowo-temperaturowych. Ich wdrożenie może przyczynić się do bardziej precyzyjnej oceny układów izolacyjnych pod kątem zawartości wilgoci i w konsekwencji zapobiegać awariom eksploatowanych transformatorów elektroenergetycznych.

2. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska mgra inż. Przemysława Rogalskiego liczy 152 strony. Praca składa się z 7 rozdziałów głównych obejmujących 127 stron, wykazu zastosowanych oznaczeń i skrótów, streszczeń w języku polskim i angielskim oraz bibliografii zawierającej 152 pozycje opublikowane w formie papierowej. W spisie cytowań literaturowych nie znajdują się adresy stron internetowych. W dysertacji nie ma spisu tabel i rysunków, ponadto praca nie zawiera załączników.

W przedstawionej bibliografii, publikacje zostały posortowane według kolejności alfabetycznej. W spisie można wyróżnić jeden autorski i sześć współautorskich artykułów naukowych Doktoranta. W bibliografii jest także informacja o jednym uzyskanym

współautorskim patencie. W mojej ocenie przegląd doniesień literaturowych, który jest stosunkowo obszerny, został przygotowany rzetelnie, jest wystarczający i zawiera wiele aktualnych pozycji obcojęzycznych, zarówno z zakresu szeroko rozumianej elektrotechniki, w tym głównie materiałoznawstwa elektrotechnicznego, techniki wysokich napięć i diagnostyki układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych z wykorzystaniem metod nieniszczących, a także zjawisk fizyko-chemicznych oraz procesów elektrycznych zachodzących w dielektrykach stałych i ciekłych.

W tekście rozprawy można wyodrębnić dwie zasadnicze części. Pierwsza z nich, obejmująca rozdziały pierwszy i drugi, jest teoretycznym wprowadzeniem do zagadnień podejmowanych w dysertacji i stanowi prawie 40% jej zasadniczej objętości. Natomiast, w drugiej części prezentowane są kolejno: opracowane metody, układ i procedury pomiarowe, następnie wyniki badań eksperymentalnych oraz rezultaty przeprowadzonych przez Doktoranta analiz i symulacji (rozd. 3-7).

W rozdziale **pierwszym** Doktorant zawarł ogólne wprowadzenie do zaproponowanej w dysertacji tematyki oraz przedstawił genezę, uzasadnienie oraz cztery główne cele podjętych w ramach jej realizacji prac naukowo-badawczych. W rozdziale tym została sformułowana następująca teza rozprawy:

„... Zastosowanie nowych sposobów nawilżania impregnowanego preszpanu oraz oleju izolacyjnego identycznych do procesów nawilżania w transformatorach energetycznych pozwala na precyzyjne wyznaczenie częstotliwościowo-temperaturowych charakterystyk wzorcowych, co przyczyni się do zapobiegania awarii transformatorów, związanej z akumulacją wilgoci w składowej stałej izolacji powyżej wartości krytycznej ...”.

Moja uwaga dotyczy bardzo jednoznacznego sformułowania „*identycznych*”, które można byłoby zastąpić mniej „ostrym, czy wyraźnym” np. analogiczne, zbliżone, odzwierciadlające, itp. nie wymagających szczegółowego dowodzenia również na drodze testowania statystycznego. W szczególności, że w przypadku eksploatacji izolacji papierowo-olejowej w transformatorze elektroenergetycznym mamy do czynienia z szeregiem zjawisk fizyko-chemicznych, a także o charakterze elektrycznym, które dodatkowo mogą występować jednocześnie, często o charakterze stochastycznym, co może wpływać na proces jej zawilgocenia. Ponadto, teza, że *„...co przyczyni się do zapobiegania awarii transformatorów, związanej z akumulacją wilgoci w składowej stałej izolacji powyżej wartości krytycznej ...*, z jednej strony wydaje się oczywista ale z drugiej aby potwierdzić ją na drodze empirycznej należałoby poddać analizie adekwatną z punktu widzenia wniosku i istotności statystycznej populację jednostek transformatorowych, co z kolei nie stanowi celu naukowego dysertacji. W moim przekonaniu wystarczający z punktu widzenia naukowego i poznawczego jest aspekt podjęty w pierwszej części zaproponowanej tezy. Przedstawione wyżej sugestie o charakterze ogólnym i dyskusyjnym nie wpływają na moją opinię, że Doktorant prawidłowo oraz w sposób przemyślany sformułował tezę rozprawy, którą konsekwentnie, w logicznym ciągu pracy udowodnił.

Następnie, w oparciu o przyjęte cele i założoną tezę Doktorant wskazał 12 punktów stanowiących zakres merytoryczny pracy oraz scharakteryzował zawartość treściową poszczególnych rozdziałów dysertacji.

W rozdziale **drugim**, który ma charakter teoretyczny, dokonano syntetycznego przeglądu wykorzystywanych obecnie w układach izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych cieczy izolacyjnych. Dokonano także analizy porównawczej ich własności fizyko-chemicznych oraz parametrów elektrycznych. Ponadto, Doktorant scharakteryzował papier i preszpan elektrotechniczny, pod kątem możliwości, zakresu i ograniczeń w ich praktycznym zastosowaniu w izolacji jednostek transformatorowych. W drugiej części tego rozdziału Doktorant skupił uwagę na charakterystyce nieniszczących metod elektrycznych szacowania poziomu zawilgocenia izolacji papierowo-olejowanej

transformatorów elektroenergetycznych. Kolejno zostały scharakteryzowane metody polaryzacyjne bazujące odpowiednio na analizie w dziedzinie czasu (PDC - Polarisation Depolarisation Current, RVM - Return Voltage Measurement) oraz częstotliwości (FDS - Frequency Domain Spectroscopy). Dodatkowo, w rozdz. 2.4 została opisana metoda chromatografii gazowej (DGA - Dissolved Gas Analysis) standardowo wykorzystywana w diagnostyce stanu izolacji papierowo-olejowej pracujących transformatorów elektroenergetycznych.

Na końcu rozdziałów od drugiego do szóstego Doktorant wprowadził podrozdziały, które stanowią podsumowanie informacji merytorycznych w nich zawartych.

W rozdziale *trzecim* scharakteryzowano nową metodę wykonywania próbek izolacji papierowo-olejowej identyczną z procesem nawilżania występującym w transformatorach energetycznych, która została opatentowana, a Doktorant jest jej współautorem (rozdz. 3.1). Przy czym, w sposób merytoryczny wskazano zalety i przewagę zaproponowanego sposobu w porównaniu do stosowanych tradycyjnie metod przygotowywania próbek wzorcowych o zadanym stopniu zawilgocenia. Następnie, w rozdz. 3.2 przedstawiono opis opracowanego i zbudowanego przez Doktoranta stanowiska pomiarowego, które zostało zastosowane do badań własności elektrycznych przygotowanych próbek izolacji papierowo-olejowej. W dalszej kolejności w rozdz. 3.3 zostały omówione podstawy teoretyczne dotyczące analizy stało- i zmiennoprądowych parametrów materiałowych izolacji papierowo-olejowej. Natomiast, w rozdz. 3.4 Doktorant scharakteryzował model przewodności skokowej opracowany w oparciu o kwantowo-mechaniczne zjawisko tunelowania elektronów między studniami potencjałów znajdujących się w matrycy o niskiej konduktywności, który został wykorzystany do analizy uzyskanych rezultatów pomiarów laboratoryjnych.

W rozdziale *czwartym* zostały zaprezentowane rezultaty przeprowadzonych badań eksperymentalnych zrealizowanych w warunkach laboratoryjnych, których celem było określenie energii aktywacji czasu relaksacji oraz aktywacji konduktywności na podstawie wyznaczonych zależności temperaturowo-częstotliwościowych konduktywności impregnowanego olejem mineralnym preszpanu, nawilżonego do wartości krytycznej zawartości wody ($5,0 \pm 0,2$) % wag. Analizę uzyskanych wyników Doktorant przeprowadził przy zastosowaniu modelu przewodności stało- i zmiennoprądowej z uwzględnieniem kwantowo-mechanicznego zjawiska tunelowania elektronów. W szczególności w rozdz. 4.1 określono wpływ zmian temperatury na wartość konduktywności stało- i zmiennoprądowej izolacji papierowo-olejowej. W rozdz. 4.2 omówiono, wyznaczone przez Doktoranta w oparciu o uzyskane wyniki pomiarowe, wartości energii aktywacji czasu relaksacji konduktywności. Natomiast w rozdz. 4.3 poddano analizie wyniki pomiarowe pod kątem określenia wartości energii aktywacji konduktywności zmiennoprądowej.

W rozdziale *piątym* Doktorant zaprezentował wyniki pomiarów i analiz wyznaczonych zależności częstotliwościowo-temperaturowych przenikalności i stratności elektrycznej zaimpregnowanego olejem mineralnym preszpanu, który został nawilżony do wartości krytycznej zawartości wody wynoszącej ($5,0 \pm 0,2$) % wag. W szczególności w rozdz. 5.1 zostały przedstawione wyniki przeprowadzonych analiz związanych z wyznaczeniem wartości energii aktywacji czasu relaksacji przenikalności elektrycznej zawilgoconej izolacji papierowo-olejowej. W rozdz. 5.2 Doktorant omówił rezultaty uzyskane w zakresie określenia zależności częstotliwościowo-temperaturowych stratności elektrycznej badanych próbek preszpanu. Natomiast w rozdz. 5.3 została poddana analizie zależność stratności od przenikalności elektrycznej.

W rozdziale *szóstym* zostały zaprezentowane wyniki badań izolacji papierowo-olejowej w układzie modelowym XY wykonanym według zaleceń CIGRE w postaci szeregowo-równoległego kondensatora płaskiego. W szczególności wyznaczono zależności częstotliwościowo-temperaturowe tangensa kąta strat dla analizowanego układu izolacyjnego

XY o parametrach $X = 50\%$ i $Y = 30\%$ i zawartości wilgoci w preszpanie na poziomie krytycznym równym $5\% \pm 0,2\%$ wag. W rozdz. 6.2 i 6.3 przedstawiono rezultaty analiz parametrów badanego układu izolacyjnego, przeprowadzonych przez Doktoranta przy wykorzystaniu oprogramowania Primary Test Menager dedykowanego dla zastosowanego podczas pomiarów miernika Dirana. Natomiast w rozdz. 6.4 przedstawiono wyniki pomiarów i analiz zależności częstotliwościowo-temperaturowych tangensa kąta strat oraz konduktywności fabrycznie nowego i nawilżonego do wartości krytycznej oleju mineralnego, przy zastosowaniu opracowanej metody nawilżania.

Na podstawie uzyskanych i zaprezentowanych w rozprawie rezultatów Doktorant sformułował 8 wniosków potwierdzających założoną tezę rozprawy, które przedstawił w rozdziale *siódmym*. Przy czym, moim zdaniem wymienione wnioski stanowią połączenie charakterystyki zakresu merytorycznego wykonanych prac naukowo-badawczych i właściwych wniosków sformułowanych w oparciu o wyniki przeprowadzonych analiz dla uzyskanych z pomiarów zależności. W części końcowej rozdziału Doktorant powtarza trzy główne cele rozprawy, podkreślając, że zostały one osiągnięte i tym samym została udowodniona założona teza pracy doktorskiej. W rozdziale tym brakuje mi wskazania propozycji kierunków prowadzenia dalszych prac naukowo-badawczych w zakresie podjętej w rozprawie tematyki.

Za najważniejsze w dysertacji pod względem merytorycznym, a przede wszystkim, z punktu widzenia wartości naukowo-poznawczej, jak również pośrednio związanej z możliwościami praktycznej implementacji uzyskanych wyników, uważam rozdziały od trzeciego do szóstego.

Reasumując, zaproponowany układ pracy jest czytelny, kolejne rozdziały tworzą logiczną oraz zamkniętą całość, a podjęte w rozprawie zagadnienia zostały sprecyzowane jednoznacznie i w mojej ocenie mają rangę naukową odpowiadającą rozprawom doktorskim.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Za najważniejsze osiągnięcia o charakterze naukowym, poznawczym i implementacyjnym Doktoranta uważam:

- przeprowadzenie w sposób rzetelny szczegółowej analizy doniesień literaturowych głównie w oparciu o publikacje zagraniczne i na podstawie jej wyników dokonanie syntetycznej oceny aktualnego stanu wiedzy dotyczącego poruszanej w rozprawie tematyki;
- współudział w opracowaniu nowego sposobu nawilżania preszpanu elektrotechnicznego impregnowanego olejem izolacyjnym, przy czym Jego rzeczywisty wkład merytoryczny będę mógł w sposób obiektywny ocenić po uzyskaniu odpowiedzi od Doktoranta na pierwszą uwagę merytoryczną do rozprawy;
- przygotowanie dla potrzeb przeprowadzonych badań próbek preszpanu, które zostały zaimpregnowane olejem izolacyjnym i nawilżone do zawartości krytycznej wilgoci ($5,0 \pm 0,2$) % wag., za pomocą w/w metody;
- opracowanie nowego sposobu nawilżania oleju izolacyjnego analogicznego do procesu zawilgocenia, jaki zachodzi w transformatorach elektroenergetycznych;
- zaprojektowanie i praktyczne wykonanie stanowiska badawczego do pomiarów stało- i zmiennoprądowych własności izolacji papierowo-olejowej, w tym trójelektrodowego kondensatora pomiarowego oraz dedykowanej komory klimatycznej wraz z układem

pomiarowo-sterującym, aplikacją umożliwiającą zarządzanie jej pracą i trzema równoległymi zabezpieczeniami termicznymi;

- opracowanie metodyki pomiarowej, w tym parametrów i warunków metrologicznych, dla których dokonywano rejestracji mierzonych wielkości oraz zaproponowanie złożonych procedur ich przetwarzania i analizy;
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych przy zastosowaniu opracowanych procedur i przygotowanego układu pomiarowego;
- wyznaczenie, na podstawie przeprowadzonych pomiarów, wzorcowych charakterystyk częstotliwościowo-temperaturowych podstawowych parametrów stało- i zmiennoprądowych zaimpregnowanego olejem mineralnym preszpanu, który został nawilżony do wartości krytycznej zawartości wody za pomocą opracowanej metody;
- opracowanie wzorcowych charakterystyk częstotliwościowo-temperaturowych tangensa kąta strat i konduktywności oleju izolacyjnego, w oparciu o rezultaty wykonanych pomiarów porównawczych oleju fabrycznie nowego oraz zawilgoconego na drodze dyfuzji z nawilżonego do wartości krytycznej preszpanu;
- sformułowanie na podstawie przeprowadzonych badań i analiz wniosków potwierdzających tezę rozprawy.

W moim przekonaniu, przedstawione wyżej osiągnięcia Doktoranta stanowią obiektywny wkład do reprezentowanej dyscypliny oraz uzasadniają jego kompetencje naukowe i rekomendują Go do stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

4. Uwagi do rozprawy

Uwagi i zastrzeżenia dotyczące ocenianej rozprawy podzieliłem na dwie grupy:

- uwagi merytoryczne (10),
- uwagi redakcyjne (9).

4.1 Uwagi merytoryczne

1. Ze spisu wykorzystanej w dysertacji literatury wynika, że Doktorant jest jednym z trzech autorów patentu pt. „*Sposób nawilżania preszpanu elektrotechnicznego impregnowanego olejem izolacyjnym*”, ponieważ jest to jedno z osiągnięć naukowych wskazanych w dysertacji prosiłbym o wskazanie udziału merytorycznego w opracowaniu tej metody.

2. Na str. 59 dysertacji Doktorant napisał „... *Zastosowana konstrukcja kondensatora pomiarowego ułatwia ponadto jego przygotowanie do pomiarów, umożliwiając łatwe czyszczenie wszystkich elementów urządzenia. ...*”. W jaki sposób odbywało się czyszczenie kondensatora i jego przygotowanie do pomiarów? Czy rozważano potencjalny wpływ zastosowanych w tym celu środków chemicznych na badany olej izolacyjny? Prosiłbym o szersze skomentowanie tego aspektu. Proszę także o opisanie sposobu nalewania badanych cieczy izolacyjnych do kondensatora pomiarowego, który zapewniał nie powstawanie pęcherzyków powietrza. Ponadto, w rozdziale tym Doktorant napisał, że: „... *Dzięki małej objętości oleju, która jest znacznie mniejsza, niż dziesięciokrotność objętości próbki pomiarowej, uzyskano pewność braku wpływu zjawisk wymiany wilgoci pomiędzy próbką a olejem na wyniki pomiarów parametrów preszpanu. ...*”. Czy powyższe stwierdzenie zostało poparte adekwatnymi pomiarami lub w inny sposób?

3. Proszę o bardziej szczegółowe przedstawienie sposobu wyznaczenia zależności przedstawionej na Rys. 4.4 (str. 79), mając na uwadze stwierdzenie „... Na podstawie danych aproksymacyjnych obliczono wartości pochodnej, wzór 3.42, które zostały przedstawione na rysunku 4.4. ...”.

4. Prosiłbym o szerszy komentarz uszczegółwiający sformułowanie „... Jak można zauważyć porównując dane modelowe przedstawione na rysunku 3.11 z danymi pomiarowymi przedstawionymi na rysunku 4.4, występuje zgodność pomiędzy nimi. ...”.

5. W dysertacji brakuje mi określenia powtarzalności i ewentualnie odtwarzalności otrzymanych wyników pomiarowych, przy zastosowaniu standardowych w analizie statystycznej metod wnioskowania statystycznego opartych na testach istotności? Czy Doktorant przeprowadził tego typu analizy mając na uwadze opracowane sposoby nawilżania impregnowanego olejem izolacyjnym preszpanu oraz oleju mineralnego oraz czy rozważał wpływ czynników metrologicznych, które mogłyby je zakłócać?

6. W dysertacji Doktorant przedstawił wyniki szacowania niepewności pomiarów temperatury dokonywanych w opracowanym i wykonanym układzie pomiarowym. Natomiast czy w analogiczny sposób została wyznaczona czułość i dokładność zaproponowanych przez Autora metod nawilżania? Prosiłbym również o opisanie procedury określania niepewności energii aktywacji.

7. Na str. 124 znajduje się stwierdzenie „... niepewność pomiaru zbliżona jest do rzeczywistej ...”. Prosiłbym o szerszy komentarz w tym zakresie.

8. Ponieważ w rozdziale siódmym Doktorant nie przedstawił możliwości i zakresu prowadzenia dalszych prac naukowo-badawczych w tematyce, której dotyczyła dysertacja, proszę o ich wskazanie.

9. Doktorant na str. 79 użył sformułowania „... Zbliżone do jedności wartości R^2 świadczą o wysokiej jakości wykonanych aproksymacji. ...”, moim zdaniem świadczą o dużym stopniu dopasowania.

10. W Tab. 5.1 (str. 98), ze względów porządkowych w przypadku wartości średniej powinno uwzględnić się pięć miejsc znaczących po przecinku oddzielającym części dziesiętne od całkowitej, analogicznie jak dla wartości umieszczonych powyżej w kolumnie.

4.2 Uwagi redakcyjne

Moim zadaniem rozprawa została zredagowana bardzo poprawnie pod względem językowym i zawiera tylko nieliczne błędy redakcyjne, stylistyczne, interpunkcyjne, niezręczności językowe, czy sformułowania nietechniczne oraz powtórzenia i omyłki literowe, które zaznaczyłem bezpośrednio w tekście dysertacji. Jednocześnie, chciałbym podkreślić, że nie wpływają one na moją pozytywną ocenę merytoryczną recenzowanej dysertacji.

1. Brak konsekwencji w sposobie oznaczania cyfrowego rysunków i tabel – użycie kropki lub jej brak po liczbie porządkowej. W tytułach rysunków i tabel jest kropka, natomiast w tekście dysertacji, w którym następuje powołanie na dany rysunek lub odpowiednio tabelę jej nie ma.

2. Doktorant w celu oddzielenia części całkowitej od dziesiętnej w większości przypadków stosuje znak przecinka: „, ”. Wyjątek stanowią zaczerpnięte z literatury przedmiotu wykresy. Dla przykładu na Rys. 2.32 (str. 46) wartości na osiach zostały przedstawione z zastosowaniem przecinka oddzielającego część całkowitą od dziesiętnej, a wartości liczbowe w legendzie z zastosowaniem kropki oddzielającej. Uwaga ta dotyczy także dużej liczby rysunków ilustrujących wyniki przeprowadzonych pomiarów.

3. W tekście można było zastosować formę skrótową Rys. w miejsce wykorzystywanej w dysertacji formy: „rysunek”, analogicznie jak w przypadku podpisów pod rysunkami. Podobnie, jak w przypadku Tab. w miejsce „tabela”.

4. W przypadku rysunków czy fotografii, które zostały zaczerpnięte z periodyków zagranicznych i zostały przetworzone przez Doktoranta, np. poprzez wprowadzenie polskich opisów osi, legend, czy innych tekstów, wówczas bardziej poprawnie należałoby w tytule rysunku wprowadzić adnotację: Opracowanie własne na podstawie [numer/y cytowanej pozycji literaturowej] w miejsce samego numeru cytowanej pozycji, np. Rys. 2.4-2.18, itd. Ponadto, w celu ujednoczenia można było wprowadzić taki sam rodzaj i wielkość czcionki, która została zastosowana we wprowadzonych przez Doktoranta opisach.

5. Pewnym utrudnieniem w interpretacji zamieszczonych w dysertacji rysunków, które zostały zaczerpnięte z cytowanych pozycji literaturowych, jest zastosowanie stosunkowo małych rozmiarów czcionek, głównie dotyczy to opisu osi i legend, których polska wersja językowa została przez Doktoranta dodatkowo wprowadzona.

6. Na str. 36 jest „*dominie*”, a poprawnie powinno być „*domenie*”.

7. Na str. 51 jest „*cynikiem*”, a poprawnie powinno być „*czynnikiem*”.

8. Na str. 79 jest „*aproksymację wielominową*”, a poprawnie powinno być „*aproksymację wielomianową*”.

9. Na str. 82 jest „*na rysunkach 4.4 i 4,5*”, a poprawnie powinno być „*na rysunkach 4.4 i 4.5*”.

Reasumując, przedstawione w recenzji uwagi i zastrzeżenia merytoryczne oraz redakcyjne, nie wpływają w sposób znaczący na wartość naukową rozprawy. Proszę jednak Doktoranta o odniesienie się do nich przed obroną. W związku z powyższym recenzowana praca nie wymaga jakichkolwiek zmian oraz uzupełnień.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy aktualnego i oryginalnego zagadnienia naukowego o zaznaczonym charakterze implementacyjnym, a uzyskane rezultaty mają duże znaczenie poznawcze. Oceniana dysertacja należy do prac doskonalących metody nieniszczące oceny stanu izolacji papierowo-olejowej transformatorów elektroenergetycznych.

Założone cele rozprawy były konsekwentnie realizowane i w mojej ocenie zostały osiągnięte. Na podstawie uzyskanych rezultatów, należy jednoznacznie stwierdzić, że założona w dysertacji teza została udowodniona. Doktorant wykazał się zdolnością samodzielnego formułowania, a następnie rozwiązywania problemów o charakterze naukowym. W mojej ocenie posiada umiejętności opracowywania metodyki badawczej, projektowania i praktycznego wykonywania układów pomiarowych i przeprowadzania przy ich wykorzystaniu eksperymentów w warunkach laboratoryjnych. Ponadto, w moim przekonaniu Doktorant wykazał się bardzo dobrym opanowaniem wiedzy teoretycznej z zakresu szeroko rozumianej elektrotechniki, w tym w szczególności dotyczącej materiałoznawstwa elektrotechnicznego, techniki wysokich napięć, diagnostyki układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych z wykorzystaniem metod nieniszczących, ale również związanych z projektowaniem układów elektronicznych, tworzeniem aplikacji komputerowych, a przede wszystkim zaawansowaną wiedzą związaną z interpretacją zjawisk fizyko-chemicznymi oraz o charakterze elektrycznym, jakie mogą zachodzić w dielektrykach stałych i ciekłych.

Uważam, że przedłożona praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, określone w obowiązującej *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach*

i tytule w zakresie sztuki. Dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie przez Radę do spraw Stopni Naukowych Politechniki Lubelskiej w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, mgr inż. Przemysław Rogalskiego do publicznej obrony przedłożonej rozprawy.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ba' with a long horizontal stroke extending to the right.