

Łódź, 11.06.2025

dr hab. inż. Paweł Rózga, prof. uczelni
Politechnika Łódzka
Instytut Elektroenergetyki
ul. Stefanowskiego 20
90-537 Łódź
pawel.rozga@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Adama Krotowskiego

pt. „*Diagnostyka własności dielektrycznych izolacji celulozowo-aramidowej stosowanej w olejowych transformatorach mocy z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych*”

1. Podstawa prawna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja sporządzona została na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej, dra hab. inż. Andrzeja Waindoka.

2. Tematyka i teza rozprawy

W obszarze zastosowań cieczy dielektrycznych do transformatorów obserwuje się w ostatnich latach intensywny rozwój cieczy o właściwościach biodegradowalnych, które stanowić mogą alternatywę dla typowo stosowanych w transformatorach olejów mineralnych. Te ostatnie, jako ciecze pochodzenia naftowego, dalekie są od bycia przyjaznymi środowisku, co wobec widocznych trendów proekologicznych w energetyce, powoduje, że należy traktować je szczególnie istotnie, gdy rozpatruje się urządzenia jakim jest transformatory z punktu widzenia kryteriów zrównoważonego rozwoju. Ciecze biodegradowalne, oprócz swoich właściwości przyjaznych środowisku, muszą spełniać oczywiście szereg wymagań w zakresie właściwości dielektrycznych i chłodzących, a więc tych właściwości, które są istotne z punktu widzenia zastosowania ich w układzie izolacyjnym transformatora. Ponadto, nowe ciecze muszą być kompatybilne z materiałami stosowanymi w transformatorze, zarówno elementami stanowiącymi izolację stałą (papier, preszpan) jak i materiałami uszczelniającymi kadź. W kontekście izolacji stałej stosowanej w transformatorach również zaobserwować można propozycje nowych rozwiązań, które stanowią alternatywę dla izolacji celulozowej, przy czym źródłem nowych propozycji nie jest aspekt biodegradowalności, ale, jak w przypadku izolacji aramidowej rozpatrywanej w niniejszej pracy doktorskiej, aspekt możliwości pracy takiej izolacji w podwyższonych temperaturach, które nie są

osiągalne dla typowej izolacji celulozowej. Uwzględniając więc mnogość nowych cieczy izolacyjnych pojawiających się w ostatnich latach na rynku, a także sporą liczbę nowych lub modyfikowanych materiałów izolacyjnych stałych, wydaje się celowa weryfikacja właściwości izolacyjnych, czy szerzej mówiąc, właściwości eksploatacyjnych takich materiałów przy uwzględnieniu, że tworzą wspólnie układ izolacyjny danego urządzenia. Z tego też względu, wybór tematyki zaproponowanej przez doktoranta jako obszaru do weryfikacji w ramach realizacji pracy doktorskiej nie stanowi wątpliwości i wpisuje się w obszar aktualnych trendów badawczych w obszarze materiałoznawstwa elektrotechnicznego i technik diagnostycznych izolacji wysokonapięciowej tzw. papierowo-olejowej. Ponadto zaznaczyć należy, że doktorant w sposób poprawny zaproponował sposób weryfikacji właściwości dielektrycznych wybranych układów wybierając do tego celu metodę PDC, jako jedną z metod diagnostycznych, należących do metod polaryzacyjnych, wykorzystywanych do oceny stanu zestarzenia i zawilgocenia papierowo-olejowych układów izolacyjnych wykorzystywanych w transformatorach.

Tak więc doktorant dobrze rozeznała obecne trendy w rozwoju układów izolacyjnych transformatorów, co pozwala uznać tematykę podjętą przez niego za ważną dla obszaru elektrotechniki, a w szczególności dla jej specyficznej gałęzi, jaką są układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych i ich diagnostyka. Temat wpisuje się więc jednoznacznie w obszar dyscypliny naukowej automatyka, elektrotechnika, elektronika i technologie kosmiczne.

Realizacja pracy doktorskiej mgr inż. Adama Krotowskiego oparta była o następujące tezy:

Teza 1

Możliwe jest opracowanie metody laboratoryjnej, która w sposób powtarzalny będzie w stanie, w sposób przyspieszony i miarodajny odtworzyć proces zawilgocenia oraz starzenia termicznego izolacji celulozowo-aramidowej wykorzystywanej w transformatorach energetycznych dużej mocy.

Teza 2

Możliwe jest opracowanie skutecznej metody analizy czasowych charakterystyk prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek izolacji celulozowo-aramidowej impregnowanej estrem syntetycznym lub naturalnym, do szacowania stopnia degradacji termicznej włókien celulozy.

Teza 3

Możliwe jest opracowanie skutecznej metody analizy czasowych charakterystyk prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek izolacji celulozowo-aramidowej impregnowanej estrem syntetycznym lub naturalnym, do szacowania stopnia zawilgocenia celulozy.

Tezy, w zakresie ich brzmienia, nie wzbudzają wątpliwości, gdyż jasno precyzują jaki obszar badawczy zostanie poddany analizie. Niestety, w przypadku tez 2 i 3, pojawia się dysonans pomiędzy ich treścią, a tym co w rzeczywistości zostało zweryfikowane w części badawczej pracy.

Chodzi mi o błędne zakwalifikowanie rozpatrywanej cieczy izolacyjnej Nytro BIO 300X jako estru naturalnego, podczas gdy przebadana ciecz jest tzw. węglowodorem (lub bio-węglowodorem) pochodzenia biologicznego i w swej strukturze chemicznej w żadnym wypadku nie posiada wiązań estrowych, a składa się z odpowiednio dobranych wskutek procesów chemicznych węglowodorów. Wydaje się, że doktorant, i wierzę, że tak właśnie jest, błędnie zakwalifikował ciecz do grupy estrów naturalnych ze względu na fakt, że bazą do jego wytworzenia są produkty pochodzenia roślinnego i mogło to być mylnie zinterpretowane, tym bardziej, że produkt Nytro BIO 300X, nie jest produktem dobrze rozpoznawalnym na rynku cieczy izolacyjnych i jego zastosowanie w transformatorach jest mocno ograniczone. Natomiast badany ester syntetyczny jest produktem powszechnie znanym i nie wzbudził wątpliwości. Niemniej, co zostanie wyraźnie podkreślone w dalszej części mojej recenzji, oczekiwałem szczegółowego wyjaśnienia zaistniałej sytuacji, jako krytycznej dla oceny pracy doktorskiej w przedstawionej formie.

Wracając do oceny pracy, drogą obraną przez doktoranta do udowodnienia sformułowanych też stał się założony program badawczy obejmujący:

- studia literaturowe w zakresie związanym z tematyką pracy,
- przygotowanie stanowiska pomiarowego do pomiaru prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek dielektryków złożonych z cieczy i materiału izolacyjnego stałego,
- przygotowanie materiału badawczego w postaci próbek o różnym stopniu zesterzenia termicznego realizowanego w warunkach laboratoryjnych wraz z ich impregnacją dwoma cieczami dielektrycznymi,
- przygotowanie materiału badawczego w postaci próbek o różnym stopniu zawilgocenia,
- przeprowadzenie pomiarów laboratoryjnych metodą PDC, wyznaczenie charakterystyk czasowych prądów polaryzacji i depolaryzacji uwzględniających wpływ temperatury pomiaru, temperatury starzenia termicznego oraz stopnia zawilgocenia przygotowanych próbek pomiarowych impregnowanych wybranymi cieczami dielektrycznymi,
- przeprowadzenie pomiarów laboratoryjnych metodą PDC, wyznaczenie charakterystyk czasowych prądów polaryzacji i depolaryzacji do określenia wpływu temperatury oraz stopnia zmieszania cieczy jako cieczy impregnującej izolację stałą NOMEX®910,
- przeprowadzenie obliczeń mających na celu określenie wpływu stopnia zesterzenia termicznego oraz stopnia zawilgocenia na wartość energii aktywacji E_k oraz dominujących stałych czasowych τ_1 i τ_2 ,
- wykonanie analizy statystycznej mającej na celu potwierdzenie powtarzalności i odtwarzalności przeprowadzonych badań laboratoryjnych,
- wykonanie analizy otrzymanych danych mających na celu sformułowanie wniosków końcowych potwierdzających założone tezy.

Program ten należy uznać za wyczerpujący i jasno pokazujący poszczególne kroki zmierzające do udowodnienia tezy pracy.

Podsumowując, podjęta przez doktoranta tematyka badawcza oraz sformułowane tezy wskazują na oryginalne podejście do zagadnienia badawczego, które, wedle wiedzy recenzenta, nie realizowane było dotychczas w formie, jaką doktorant zaproponował. Temat pracy ma charakter nowatorski i obejmuje materiały, które są w kręgu zainteresowań badaczy na całym świecie zajmujących się obszarem układów izolacyjnych stosowanych w transformatorach energetycznych.

3. Dane bibliograficzne rozprawy i jej ogólna charakterystyka

Rozprawa opracowana została w języku polskim i zawiera łącznie 160 stron. Praca podzielona jest na 13 rozdziałów, przy czym doktorant za jeden z rozdziałów uznał również spis pozycji literaturowych. Zasadnicze rozdziały poprzedzają, nie uwzględnione w spisie treści, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz zastosowanych symboli. Zawartość poszczególnych rozdziałów nie wzbudza większych wątpliwości poza rozdziałami 3 i 4. W rozdziale 3 bowiem doktorant opisuje papier izolacyjny typu „Kraft” oraz charakteryzuje oleje elektroizolacyjne by następnie w rozdziale 4 dokonać analizy izolacji celulozowo-aramidowej (i samej aramidowej, co nie jest uwzględnione w spisie treści) i ponownie skupić się na cieczach elektroizolacyjnych, tym razem nowoczesnych. Poza faktem, że rozdział 4.2.1 pojawia się dwukrotnie, to wątpliwym jest nazwanie estru syntetycznego „cieczą nowoczesną”, kiedy jest ona na rynku cieczy dielektrycznych od lat 90-tych XX wieku, a więc już od ponad 30 lat. Uważam, że zawartość rozdziałów 3 i 4 powinna zostać zamknięta w jednym rozdziale o „materiałach izolacyjnych stosowanych w transformatorach olejowych” z podziałem na izolację stałą i ciekłą. Ponadto, w opisie cieczy izolacyjnych brak mi wzmianki o nowoczesnych cieczach wytwarzanych w technologii GTL (Gas-to-Liquids), których stosowanie jest już względnie szeroko rozpowszechnione na świecie od ponad 10 lat. Kolejne rozdziały tj. 5 i 6 są już bardziej spójne i wskazują na dobre zrozumienie zagadnień pomiarowych z wykorzystaniem metody PDC przez autora. Natomiast część praktyczna pracy zawarta w rozdziałach od 7 do 11 ma już w pełni jasny i klarowny przekaz na temat tego co zrobił autor i jakie wnioski wypracował. Zwracam jednak uwagę, że spis treści w kontekście rozdziału 7 nie uwzględnia podrozdziałów, które faktycznie w pracy się pojawiły. Pracę kończy rozdział 12 wskazujący na kierunki rozwoju w obszarze badań autora.

Jeśli chodzi o zawartość spisu pozycji literaturowych to jest ich 130 i obejmuje on zarówno pozycje polsko- jak i anglojęzyczne, stanowiące względnie równoważnie pozycje książkowe, artykuły z czasopism z listy JCR oraz artykuły konferencyjne. W spisie literatury można znaleźć

również odniesienia do kart katalogowych produktów czy stron www. Tak jak w uwadze zawartej w p. 2 tej recenzji, trudno mi zrozumieć błąd autora, gdy cytuje jednak bądź co bądź pozycje [30], [31], [32] czy [121], w których producent jednoznacznie definiuje typ swojej cieczy. Pewnym mankamentem jest tu także nieco ograniczony zakres pozycji literaturowych z ostatnich 2-3 lat. W kontekście bibliografii, należy wskazać kilka współautorskich publikacji doktoranta.

Generalnie układ rozprawy jest poprawny. Tabele i rysunki ilustrujące dokonania doktoranta są czytelne i przygotowane z odpowiednią starannością.

4. Ocena rozprawy

Recenzowana praca doktorska podejmuje ważny problem badawczy z obszaru układów izolacyjnych transformatorów energetycznych, przy czym zaznaczyć należy, że obszar tematyczny mniej dotyczy elektroenergetyki krajowej, gdzie zapotrzebowanie na układy izolacyjne z materiałem celulozowo-aramidowym jest mocno ograniczone ze względu na brak wysokich temperatur pracy, w których operują transformatory, a także ograniczone fundusze krajowych operatorów do stosowanie znacznie droższych rozwiązań układów izolacyjnych niż klasyczne olejowo-celulozowe. Niemniej, temat właściwości dielektrycznych układów mieszanych wpisuje się w trendy światowe.

W pracy mgr Krotowskiego wyodrębnić można jednoznacznie część teoretyczną, opisaną już pokrótce wyżej, oraz tę ważniejszą z punktu widzenia oceny osiągnięć doktoranta, część eksperymentalną, w której doktorant przedstawia metodologię prowadzenia badań oraz otrzymane wyniki i ich dyskusję.

W części teoretycznej, szczególnie w rozdziałach 5 i 6, doktorant wykazuje się wystarczającą wiedzą teoretyczną do realizacji części eksperymentalnej pracy. Z przedstawionego opisu widać, że metoda PDC, i generalnie zjawiska polaryzacyjne w dielektryku, są znane doktorantowi w stopniu umożliwiającym mu interpretację wyników pomiarów, a więc i dowodzenia na ich podstawie sformułowanych tez.

Najważniejsza część rozprawy, czyli część eksperymentalna, stanowi wkład doktoranta w obszar badań nad właściwościami dielektryków stałych impregnowanych przy uwzględnieniu różnych czynników wpływających na te właściwości jak stopień zesterzenia i stopień zawilgocenia. W pierwszej kolejności, w rozdziale 7, przedstawione zostały przez doktoranta techniki i procedury przygotowania próbek do pomiarów. Uważam ten rozdział za bardzo wartościowy, gdyż sposób opisu przedstawiony jest na wysokim poziomie dokładności, wskazującym na precyzyjne przeprowadzenie procesu przygotowania materiału badawczego, co znacząco uwiarygadnia wyniki opisane w dalszej części pracy. Ponadto, doktorant urzeczywistnia proces przygotowania próbek do

badan prezentując zdjęcia z kolejnych faz przygotowania materiału badawczego oraz zdjęcia wykorzystanych podczas pomiarów stanowisk badawczych i aparatury.

Kolejne rozdziały pracy to prezentacja wyników przeprowadzonych eksperymentów wraz z ich analizą.

W rozdziale 8 autor dzieli wyniki z punktu widzenia wpływu danego czynnika na otrzymane charakterystyki PDC. Analiza uwzględniła wpływ temperatury pomiaru, stopień zestarzenia termicznego stopień zawilgocenia oraz wpływ zawartości cieczy estrowej w miksturze oleju mineralnego z estrem. Zasadniczo doktorant udowodnił, że dany rozpatrywany czynnik ma wpływ na pomierzone prądy polaryzacji, a zatem metoda PDC umożliwia diagnostykę stanu zestarzenia termicznego oraz stopnia zawilgocenia układu izolacyjnego zbudowanego na bazie celulozowo-aramidowego papieru izolacyjnego impregnowanego daną cieczą dielektryczną. Ponadto, doktorant udowodnił istniejący wpływ temperatury pomiaru oraz stopnia zmieszania oleju mineralnego i estru syntetycznego na wartość rejestrowanych prądów polaryzacji i depolaryzacji uzyskanych metodą PDC. Tym samym opisane w rozdziale 8 prace eksperymentalne znacząco przyczyniły się do udowodnienia sformułowanych w pracy doktorskiej tez. Jednakże, jak już wcześniej zaznaczyłem w recenzji, krytycznym jest uznanie płynu BIO 300X za ester naturalny, a więc i formułowanie wniosków jakoby otrzymane wyniki wskazywały na możliwość oceny stanu izolacji badanego złożonego układu izolacyjnego w kontekście estru naturalnego właśnie. Wydaje się, że wyniki dla estru syntetycznego i estru naturalnego powinny być do siebie bardziej zbliżone. W przypadku porównania wyników między estrem syntetycznym a płynem BIO 300X różnice są znaczące, co w ocenie recenzenta wynika właśnie z odmiennego składu chemicznego obu cieczy (brak wiązań estrowych w strukturze chemicznej płynu BIO 300X oraz brak atomów tlenu), co pociąga za sobą inny poziom higroskopijności (poziomu nasycania wilgocą) obu cieczy. Klasyczny ester naturalny („moisture saturation” ok. 1000 ppm w 20 °C) byłby w tym zakresie bliższy estrowi syntetycznemu („moisture saturation” ok. 2000 ppm w 20 °C), podczas gdy płyn BIO 300X jest bliższy olejowi mineralnemu („moisture saturation” ok. 200 ppm w 20 °C).

W rozdziale 9 autor wykorzystał natomiast otrzymane podczas eksperymentu przebiegi prądów polaryzacji do wyznaczenia energii aktywacji tj. minimalnej wartości energii, przy której inicjowane są procesy zmiany orientacji dipoli elektrycznych w dielektryku na skutek przyłożenia zewnętrznego pola elektrycznego, a także do określenia wartości stałych czasowych relaksacji τ_1 i τ_2 . W analizie założono, że wartość energii aktywacji oraz wspomnianych stałych czasowych mogą być zależne, jak w przypadku prądów polaryzacji, od stopnia degradacji termicznej izolacji, stopnia zawilgocenia izolacji oraz stopnia zmieszania oleju mineralnego i estru syntetycznego (przy uwzględnieniu charakteru polarnego cieczy estrowej). Założenie te sprawdziły się w wyniku

przeprowadzonych analiz, a otrzymane relacje, co w pewnym sensie było oczekiwane, potwierdziły wnioski z badań eksperymentalnych opisanych w rozdziale 8.

Rozdział 10, nieco mniej istotny w ocenie recenzenta, obejmuje swoim zakresem analizy powtarzalności i odtwarzalności wyników otrzymanych w ramach przeprowadzonego eksperymentu. Doktorant użył do tego celu narzędzi statystycznych w postaci parametrycznych i nieparametrycznych testów istotności (głównie w zakresie sprawdzenia równości średnich i równości wariancji) udowadniając, że jego wyniki mają charakter wyników powtarzalnych i odtwarzalnych.

Kończące pracę rozdziały 11 i 12 stanowią podsumowanie dokonanych analiz w formie zbiorczego zestawienia wniosków przedstawionych w toku wcześniejszych opisów (rozdział 11) oraz zaprezentowania zagadnień otwartych (rozdział 12), które, zdaniem autora, stanowiłyby kierunek rozwoju dla tematyki poruszanej w doktoracie.

Z analizy materiału zawartego w rozdziałach od 7 – 12 wynikają najważniejsze osiągnięcia doktoranta. Osiągnięciami tymi, moim zdaniem, są:

- opracowanie stanowiska pomiarowego do wykonania eksperymentu polegającego na pomiarze prądów polaryzacji i depolaryzacji próbek składających się z cieczy dielektrycznej i materiału izolacyjnego stałego,
- opracowanie spójnego metodologicznie programu badań uwzględniającego szereg istotnych wskaźników mogących mieć wpływ na otrzymane wyniki jak stopień zesterowania termicznego, stopień zawilgocenia, temperatura pomiaru oraz stopień zmieszania cieczy typowej tj. oleju mineralnego z cieczą alternatywną tj. estrem syntetycznym,
- przeprowadzenie złożonych pomiarów bazujących na metodzie PDC uwzględniających wyznaczenie charakterystyk czasowych prądów polaryzacji i depolaryzacji w zakresie jak powyżej, a następnie przeprowadzenie złożonej analizy wartości energii aktywacji E_k oraz dominujących stałych czasowych τ_1 i τ_2 ,
- wykonanie analizy otrzymanych danych mających na celu sformułowanie wniosków końcowych potwierdzających założone tezy.

Osiągnięcia te potwierdzają kompetencje doktoranta do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i stanowią o wartości naukowej rozprawy doktorskiej oraz oryginalności rozwiązane zagadnienia naukowego.

5. Uwagi, pytania, zagadnienia dyskusyjne

Praca jest dobrze przygotowana od strony edytorskiej z niewielkimi niedociągnięciami w zakresie numeracji rozdziałów, w tym w spisie treści. Wyniki uzyskane przez doktoranta są poprawnie zobrazowane graficznie. Ponadto, praca odznacza się dobrze przygotowaną stroną

stylistyczną. Zasadniczo, nie zanotowałem rażących błędów logicznych, interpunkcyjnych czy ortograficznych. W związku z powyższym, w części uwag i dyskusji skupiłem się na kwestiach merytorycznych, stanowiących najistotniejszy element dyskusji naukowej z doktorantem. Poniżej przedstawiam więc pytania i uwagi, o których wyjaśnienie proszę.

- 1) Doktorant błędnie zakwalifikował badaną ciecz BIO 300X do grupy estrów naturalnych, co komplikuje, jak wspomniałem wyżej, ocenę realizacji tej pracy, gdyż ciecz BIO 300X takim estrem nie jest. Dlatego też oczekuję od doktoranta szczegółowego wyjaśnienia źródła pomyłki w tym zakresie i wyjaśnienia zaistniałej sytuacji, jako krytycznej dla oceny pracy doktorskiej w przedstawionej formie.
- 2) W tabeli 4.9 w zakresie przenikalności dielektrycznej płyn BIO 300X ma przypisaną wartość równą 3,2. Jest to wartość błędna, gdyż płyn BIO 300X charakteryzuje się przenikalnością dielektryczną na poziomie 1,99 (zgodnie z kartą katalogową i innymi dokumentami w tym zakresie).
- 3) Podrozdział 4.2 powinien mieć tytuł „Nowoczesne ciecze estrowe”, gdyż pomija w rozważaniach rozwiązania takie jak ciecze typu GTL. Ponadto, doktorant nie wspomina o estrach modyfikowanych i mieszanych, dla których istnieje przecież stosowana norma IEC 63012.
- 4) Na str. 42 doktorant wskazuje płyn BIOTEM firmy ABB jako ester naturalny dostępny na rynku. Płyn ten nie jest już jednak w fazie produkcji i jednocześnie w fazie sprzedaży. Brakuje mi tu natomiast informacji o cieczach produkowanych przez firmę Ergon (oba typy estrów).
- 5) Na rys. 9.4, w przypadku cieczy Midel 7131, brakuje we wzorze prostej regresji zmiennej x , zapewne przy wartości $-0,0076$.
- 6) Dla wzmiankowane wyżej prostej regresji współczynnik korelacji R^2 wynosi zaledwie 0,7637, co wskazywałoby na słabą korelację pomiędzy danymi z pomiarów a dopasowaną prostą. Brak jest jednak w pracy komentarza w tym zakresie. Z czego, z punktu widzenia fizyki zjawisk, może wynikać taka rozbieżność?
- 7) Proszę o zrewidowanie wniosku zapisanego na str. 108, że „estry naturalne zwykle są cieczami o większej polarności w porównaniu z estrami syntetycznymi. Większa polarność cieczy może sprzyjać interakcjom z produktami starzenia celulozy, jonami oraz wodą, co powoduje ograniczenie energii aktywacji, potrzebnej do spolaryzowania dielektryka” ze względu na fakt, że zbadany płyn BIO 300X nie jest estrem naturalnym a węglowodorem pochodzenia biologicznego, a więc nie jest co do zasady cieczą polarną.
- 8) W rozdziale 9 brakuje mi jednoznacznie sformułowanej myśli co oznacza, w kontekście porównania obu zbadanych cieczy, niższa energia aktywacji w przypadku płynu BIO 300X.

Czy spowoduje to szybsze zestarzenie izolacji stałej w tym płynie przy podwyższonej temperaturze? Proszę o uwypuklenie tej kwestii w odpowiedzi, ale ze zwróceniem uwagi na praktyczne aspekty obserwacji, ważne z punktu widzenia eksploatacji układu (materiałów) w warunkach rzeczywistych.

- 9) Brakuje mi także jednoznacznego wniosku praktycznego co oznaczają niższe/wyższe wartości energii aktywacji E_k oraz dominujących stałych czasowych τ_1 i τ_2 .
- 10) Badania płynu BIO 300X dowodzą, że wartość DP izolacji celulozowej zestarzonej termicznie w tym płynie osiąga 250 (koniec czasu życia celulozy) po znacznie krótszym czasie niż w oleju mineralnym, a tym bardziej estrze syntetycznym. Czy z wyników doktoranta można również pośrednio wywnioskować, że izolacja celulozowo-aramidowa w płynie BIO 300X zestarzeje się szybciej niż w estrze syntetycznym?
- 11) Na rys. 9.9 współczynniki korelacji R^2 są również stosunkowo niskie ($<0,9$), co także wskazuje na niską korelację pomiędzy wynikami pomiarów a dopasowaną prostą. Proszę o komentarz.
- 12) Przyjęte zakresy procentowe mieszaniny estru syntetycznego i oleju mineralnego są z założenia poprawnym podejściem. Niemniej w przypadku procesu retrofilingu pozostałości oleju mineralnego w uzwojeniach transformatora po jego zlaniu estrem są jednak dużo niższe. Czy doktorant nie rozważał zastosowania niższej zawartości procentowej oleju mineralnego (5-10%), aby odzwierciedlić bardziej realny stan transformatora po wymianie cieczy z oleju mineralnego na ester syntetyczny?

6. Ocena ogólna rozprawy i wniosek końcowy

Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam jako spełniającą wymogi prac doktorskich, ale z uwagą krytyczną konieczną do wyjaśnienia przez doktoranta. Zasadniczo, jeśli dopuszczałby tego stosowny Regulamin chciałbym zawnioskować o wniesienie poprawek do pracy w zakresie zmiany nazewnictwa cieczy izolacyjnej Nytro BIO 300X z niepoprawnej „ester naturalny” na poprawną „biowęglowodór” lub „węglowodór pochodzenia biologicznego”. Jeśli kwestia poprawy pracy nie jest przewidziana stosownym Regulaminem oczekuję wyjaśnienia źródła popełnienia takiego błędu i jednoznacznej deklaracji na piśmie, wraz z wyjaśnieniem, jakie powinno być prawidłowe przypisanie cieczy Nytro BIO 300X do grupy cieczy elektroizolacyjnych.

Poza powyższą, istotną uwagą, praca posiada walory umożliwiające jej pozytywną ocenę jako pracy doktorskiej, co zostało wskazane jednoznacznie w punkcie 4.

Zamieszczone uwagi i komentarze zawarte w pytaniach do doktoranta nie umniejszają w żadnym stopniu pozytywnej ocenie rozprawy.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Adama Krotowskiego pt.: **„*Diagnostyka własności dielektrycznych izolacji celulozowo-aramidowej stosowanej w olejowych transformatorach mocy z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych*”** spełnia wymagania obowiązującej ustawy w stopniu wystarczającym i może zostać dopuszczona do publicznej obrony.