

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

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgra inż. Konrada KIERCZYŃSKIEGO**  
**pt. „*Opracowanie sposobu wyznaczania zawilgocenia izolacji***  
***papierowo-olejowej transformatorów na podstawie***  
***pomiarów rezystancji stałoprądowej”***

**Podstawa formalna wykonania recenzji:**

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Lubelskiej w Lublinie dra hab. inż. Wojciecha Jarzyny, profesora uczelni, z 21 lipca 2020 r..

Promotorem rozprawy jest dr hab. Paweł ŻUKOWSKI, prof. uczelni.

**1. Ocena aktualności podjętej tematyki**

Od wielu lat celuloza w postaci papieru i preszpanu elektrotechnicznego impregnowanych olejem izolacyjnym jest najczęściej stosowanym materiałem izolacyjnym w transformatorach elektroenergetycznych. Należy przy tym zauważyć, że zawilgocenie celulozy stanowi jedno z najpoważniejszych zagrożeń dla poprawnej pracy tych układów. W praktyce eksploatacyjnej można wskazać dwie podstawowe przyczyny zawilgacania izolacji celulozowej, tj.: nieszczelność kadzi oraz proces utleniania celulozy. Woda jest produktem rozpadu celulozy, a jednocześnie stanowi akcelerator procesu jej postępującej w czasie degradacji. Przy czym, roczny przyrost zawilgocenia celulozy wzrasta z czasem pracy jednostki transformatorowej, a jego dynamikę szacuje się na poziomie około 0,1 pkt. % na rok. Jednocześnie, po przekroczeniu poziomu 2,5 % zawilgocenia następuje znaczne przyspieszenie procesu degradacji celulozy, a zawilgocenie izolacji wynoszące 3 % uważane jest za krytyczne. Należy przy tym nadmienić, że większość jednostek transformatorowych pracujących, zarówno w polskim systemie elektroenergetycznym, jak również w większości krajów europejskich, jest eksploatowanych powyżej 30 lat. Do najbardziej niekorzystnych skutków zawilgocenia izolacji transformatora można zaliczyć podatność układu na wysokoenergetyczne wyładowania niezupełne, zwiększenie prawdopodobieństwa przebiecia cieplnego, a także możliwość wystąpienia zjawiska „*bubble effect*”. Najgroźniejszym skutkiem zawilgocenia izolacji jest „*efekt bąbelkowania*”, który polega na gwałtownym odparowaniu wody z celulozy po przekroczeniu krytycznych poziomów temperatury i jej zawilgocenia. Zjawisku temu towarzyszy znaczny wzrost ciśnienia wewnątrz kadzi transformatora, który może doprowadzić do jej rozszczelnienia i niekontrolowanego wycieku oleju, co w konsekwencji może doprowadzić do pożaru, a w skrajnych przypadkach nawet do

eksplozji jednostki transformatorowej. W ciągu ostatnich kilku lat w Polsce odnotowano co najmniej kilkanaście pożarów transformatorów i autotransformatorów elektroenergetycznych dużych i największych mocy, co prowadziło do powstania poważnych awarii systemowych. Skutkiem niekontrolowanego wyłączenia pracującego transformatora mogą być znaczne straty finansowe związane z koniecznością dokonania jego naprawy lub wymiany (zaprojektowanie, wybudowanie, przetransportowanie), a także wynikających z możliwości niedostarczenia energii elektrycznej do odbiorców. Dlatego w ostatnich latach notuje się dynamiczny rozwój metod diagnostycznych i układów kontrolujących pracę transformatorów, w sposób ciągły w systemie on-line, podczas ich normalnej eksploatacji w warunkach przemysłowych.

Mając powyższe na uwadze, uważam, że podjęta tematyka, przyjęte cele i założona teza rozprawy, które dotyczą doskonalenia technik diagnostycznych oceny stanu układów izolacyjnych, mając w szczególności na uwadze problem zawilgocenia preszpanu elektroizolacyjnego, są aktualne oraz ważne pod względem naukowym i poznawczym. Ponadto, w mojej ocenie osiągnięte efekty i uzyskane w ramach realizacji rozprawy rezultaty mają także duże znaczenie implementacyjne. Opracowany sposób wyznaczania zawilgocenia izolacji w oparciu o wyniki pomiarów rezystancji stałoprądowej, który został objęty ochroną patentową, może stanowić skuteczną, dodatkową metodę diagnostyczną, jaka może być stosowana podczas normalnej pracy transformatorów.

## 2. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska mgr inż. Konrada Kierczyńskiego liczy 128 stron tekstu. Składa się z ośmiu rozdziałów głównych, streszczeń w języku polskim i angielskim, wykazu zastosowanych oznaczeń i skrótów, a także spisu cytowań literaturowych, zawierającego 149 pozycji, które zostały posortowane alfabetycznie. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant jest współautorem odpowiednio trzech artykułów naukowych (pozycje 146-148) opublikowanych w znaczących czasopiśmie zagranicznych o wysokim wskaźniku oddziaływania IF (ang. Impact Factor), tj. Cellulose (IF=3,9) i IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (IF = 2,76) oraz dwóch referatów konferencji międzynarodowych (pozycje: 65, 115). W sposób pośredni świadczy to o wartości merytorycznej rezultatów uzyskanych w ramach realizacji recenzowanej dysertacji. Ponadto, w opracowanym zestawieniu bibliograficznym został wykazany patent pt. „*Sposób oznaczenia zawartości wilgoci w elementach stałych układu izolacji ciekło-stałych transformatorów energetycznych*”, stanowiący wymierny efekt zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej prac naukowo-badawczych, którego mgr inż. Konrad Kierczyński jest współtwórcą. W mojej ocenie przegląd doniesień literaturowych, który jest dość obszerny, został przygotowany rzetelnie, jest wystarczający i zawiera wiele aktualnych pozycji obcojęzycznych z zakresu szeroko rozumianej elektrotechniki, w tym technologii i materiałoznawstwa elektrycznego, fizyki dielektryków stałych i ciekłych, techniki wysokich napięć, a także dotyczących problematyki diagnostyki układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych.

W rozdziale **pierwszym** znajduje się krótkie wprowadzenie do podjętej w rozprawie problematyki, które stanowi uzasadnienie aktualności podjętej w dysertacji tematyki, a także genezę wykonanych prac naukowo-badawczych. Ponadto, w rozdziale tym Doktorant przedstawił podstawowy cel i zakres podjętych prac naukowych, wskazał zaplanowane do wykonania zadania badawcze, a przede wszystkim zdefiniował następującą tezę dysertacji:

***„... Badania stałoprądowe rezystancji izolacji transformatorów energetycznych pozwolą na opracowanie sposobu wyznaczenia stopnia jej zawilgocenia ....”***

W moim przekonaniu Doktorant prawidłowo, w sposób przemyślany i syntetyczny sformułował tezę rozprawy, którą następnie konsekwentnie, w logicznym ciągu pracy, udowodnił. W rozdziale tym została zaprezentowana również krótka charakterystyka zawartości merytorycznej poszczególnych rozdziałów pracy.

Rozdział **drugi** ma charakter teoretyczny, w którym Doktorant przedstawił, w oparciu o przeprowadzony przegląd doniesień literaturowych, własności oraz parametry materiałów izolacyjnych wykorzystywanych w transformatorach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć. W szczególności, zostały scharakteryzowane kolejno: mineralne oleje izolacyjne, estry syntetyczne i naturalne, a także papier i preszpan elektrotechniczny. Ponadto, został opisany proces przygotowania izolacji papierowo-olejowej. Przy czym, największa uwaga Doktoranta została skierowana na problematykę procesów starzeniowych i ich wpływ na właściwości rozpatrywanych materiałów dielektryków stałych i ciekłych.

W rozdziale **trzecim**, który ma również charakter przeglądowy, przedstawiono klasyfikację metod wykorzystywanych do diagnostyki stanu układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych. W tym zakresie wyszczególniono kolejno metody pomiarowe stosowane w celu dokonania ogólnej oceny stanu izolacji papierowo-olejowej, a także mające zastosowanie do oceny stopnia zawilgocenia oraz zesterzenia izolacji celulozowej, wykazując przy tym metody pośrednie i bezpośrednie. W sposób szczegółowy zostały przez Doktoranta opisane polaryzacyjne metody diagnostyczne oparte na analizie zjawisk relaksacyjnych w dziedzinie czasu i częstotliwości, które umożliwiają wyznaczenie ilości wody zawartej w preszpanie oraz oszacować stopień jego degradacji, podczas pomiarów bezinwazyjnych wykonywanych w czasie normalnej eksploatacji transformatora. W szczególności w kolejnych podrozdziałach zostały scharakteryzowane: metoda analizy prądów polaryzacji i depolaryzacji (PDC – ang. Polarization Depolarization Current); metoda napięcia powrotnego (RVM – ang. Return Voltage Measurement); metoda spektroskopii częstotliwościowej (FDS – ang. Frequency Domain Spectroscopy); metoda chromatografii gazowej (DGA – ang. Dissolved Gas Analysis).

W rozdziale **czwartym** Doktorant opisał zastosowaną metodykę przygotowywania próbek preszpanu elektrotechnicznego, o różnym stopniu zawilgocenia, które były wykorzystywane podczas badań laboratoryjnych przy zastosowaniu metody PDS. Ponadto, zostało scharakteryzowane zaprojektowane i zbudowane stanowisko pomiarowe, użyte przez Doktoranta w badaniach stałoprądowych zaimpregnowanego olejem izolacyjnym preszpanu.

W rozdziale **piątym** zostały przedstawione wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Doktoranta w celu określenia zależności konduktywności stałoprądowej przygotowanych próbek preszpanu elektrotechnicznego od stopnia zawilgocenia oraz wartości temperatury. Przy czym, Doktorant przeprowadził analizę uzyskanych wyników pomiarowych, wykorzystując elementy mechaniki kwantowej, a w szczególności na podstawie zjawiska tunelowania (hoppingu) elektronów. W tym zakresie zostały zaprezentowane cztery charakterystyki ilustrujące kolejno: zależności czasowe logarytmu naturalnego natężenia prądu ładowania impregnowanych olejem próbek preszpanu, przy zadanej temperaturze, dla czterech wybranych wartości wilgotności (Rys. 5.2); zależność energii aktywacji od zawartości wilgoci w badanych próbkach preszpanu (Rys. 5.4); zależności logarytmu naturalnego konduktywności stałoprądowej impregnowanego preszpanu elektrotechnicznego od zawartości wilgoci wyrażonej w procentach wagowych, wyznaczone porównawczo dla dwóch wartości temperatury (Rys. 5.3); zależności wielkości zawartości wilgoci w preszpanie na ruchliwość nośników ładunku  $\mu_o$ , przedstawione porównawczo dla dwóch wartości temperatury (Rys. 5.5). Przy czym, dla każdej z badanych zależności Doktorant przeprowadził oddzielnie analizę występujących zjawisk fizyko-chemicznych. W oparciu o wyznaczone zależności wykazano, że przewodnictwo stałoprądowe zawilgoconego preszpanu odbywa się na drodze hoppingu

elektronów (tzw. przewodność skokowa) pomiędzy najbliższymi położonymi studniami potencjału wytworzonymi przez molekuly wody. W następnym kroku zostały wyznaczone zależności średniej odległości między molekulami wody w preszpanie oraz szybkości spadania funkcji falowej elektronu od zawartości wilgoci wyrażonej w procentach wagowych, które zilustrowano odpowiednio na Rys. 5.7 i 5.8. Dodatkowo, Doktorant określił zależności logarytmu naturalnego konduktywności stałoprądowej impregnowanego preszpanu elektrotechnicznego od zawartości wilgoci (uzyskane z obliczeń empirycznych oraz uzyskane na podstawie pomiarów) oraz od średniej odległości pomiędzy molekulami wody, które przedstawił, odpowiednio na Rys. 5.10 i 5.11, porównawczo dla dwóch wartości temperatury pomiarowej 297 K i 318 K. Na podstawie przeprowadzonych analiz Doktorant sformułował wnioski, które zostały przedstawione w podsumowaniu tego rozdziału.

W rozdziale tym brakuje mi jednoznacznego i syntetycznego przedstawienia celu, a przede wszystkim wynikającego z niego zakresu przeprowadzonych eksperymentów, które poprzedzałyby prezentację uzyskanych wyników badań i analiz, w sposób analogiczny, jak w rozdziale szóstym.

W rozdziale *szóstym* przedstawiono wyniki badań wpływu potencjalnych parametrów, na własności izolacji papierowo olejowej transformatorów elektroenergetycznych. W szczególności wyznaczono zależności czasowe natężenie prądu skrośnego dla czterech próbek preszpanowych impregnowanych olejem mineralnym o różnej zawartości wilgoci, dla sześciu wartości temperatury pomiarowej oraz dla sześciu natężeń pola elektrycznego. W ramach prezentacji uzyskanych rezultatów w rozdz. 6.1 zostały przedstawione przebiegi czasowo-prądowe ilustrujące wpływ zmian natężenia pola elektrycznego, przy stałej wartości temperatury, które pokazano oddzielenie dla czterech wybranych zawartości wilgoci w badanych próbkach preszpanu (Rys. 6.1-6.4). Następnie zostały zaprezentowane zależności natężenia prądu skrośnego, które zostały zilustrowane oddzielnie dla sześciu analizowanych wartości temperatury dla preszpanu o jednej zawartości wilgoci, przedstawiające przebiegi dla wszystkich badanych natężeń pola elektrycznego (Rys. 6.5-6.10). Na kolejnych rysunkach (Rys. 6.11-6.16) zostały zaprezentowane charakterystyki czasowo-prądowe, uzyskane dla jednej wartości natężenia pola elektrycznego, wyznaczone oddzielnie dla sześciu wartości temperatury pomiarowej, na których zilustrowano przebiegi dla czterech wartości zawilgocenia preszpanu elektrotechnicznego. Wyznaczono również zależności czasowe natężenie prądu skrośnego, przy zadanej stałej wartości temperatury pomiarowej, prezentując przebiegi uzyskane dla czterech wartości zawilgocenia próbek preszpanu, które w celach porównawczych przedstawiono na trzech rysunkach (Rys. 6.17-6.19), oddzielnie dla trzech wybranych wartości natężenia pola elektrycznego.

W rozdz. 6.2 Doktorant przedstawił wyniki analiz wpływu zawilgocenia, natężenia pola elektrycznego i temperatury na wartość energii aktywacji konduktancji stałoprądowej preszpanu elektrotechnicznego, której wartość została obliczona na podstawie ustalonej wartości natężenia prądu skrośnego wyznaczonych w rozdz. 6.1. W tym zakresie zostały zilustrowane przebiegi zależności konduktancji preszpanu od wartości natężenia pola elektrycznego, dla stałej wartości temperatury, które wyznaczono oddzielnie dla czterech zawilgocień badanych próbek (rys. 6.20). Natomiast na Rys. 6.21 przedstawiono zależność konduktancji stałoprądowej preszpanu o zadanej wartości wilgotności od natężenia pola elektrycznego, przy czym wykreślono przebiegi oddzielenie dla sześciu analizowanych wartości temperatury. W kolejnym kroku dokonano analizy wpływu na konduktancję wartości natężenia pola elektrycznego. Wykonano wykresy Arrheniusa dla preszpanu o określonej zawartości wilgoci, ilustrując przebiegi dla dwóch skrajnych wartości średniej natężenia pola elektrycznego, które przedstawiono na Rys. 6.22 oraz analogiczne przebiegi uzyskane dla czterech badanych wilgotności wyznaczone doświadczalnie dla wszystkich sześciu natężeń pola elektrycznego, jakie zilustrowano na Rys. 6.23. Na ich podstawie zostały wyznaczone

wartości energii aktywacji dla impregnowanego olejem izolacyjnym preszpanu o zadanej wilgotności, dla wszystkich analizowanych wartości natężenia pola elektrycznego (Tabl. 6.1, 6.2).

Natomiast w rozdz. 6.3 zostały przedstawione wyniki przeprowadzonej przez Doktoranta analizy porównawczej konduktancji stałoprądowej oleju izolacyjnego oraz preszpanu elektrotechnicznego. W pierwszym etapie Doktorant przeprowadził badania doświadczalne wielkości konduktancji przy prądzie stałym oleju izolacyjnego przy zastosowaniu opracowanego stanowiska pomiarowego, regulując wartość napięcia stałego w zakresie od 20 do 1000 V, przy stałej grubości warstwy oleju. Jako uzyskane reprezentatywne wyniki zostały przedstawione zależności czasowe natężenia prądu przepływającego przez olej izolacyjny, które zilustrowano na Rys. 6.24, oddzielnie dla pięciu wartości natężenia pola elektrycznego (napięcia zasilającego) i przy stałej, zadanej wartości temperatury. Dodatkowo, na Rys. 6.25 zostały przedstawione wykresy Arrheniusa dla konduktancji oleju izolacyjnego uzyskane dla pięciu wartości natężenia pola elektrycznego. Natomiast w tabl. 6.4 zostały zestawione obliczone wartości energii aktywacji konduktancji stałoprądowej oleju izolacyjnego dla analizowanych wartości natężenia pola elektrycznego (napięcia zasilającego). Na Rys. 6.26 w celach porównawczych zilustrowano przebiegi zależności energii aktywacji konduktancji oleju izolacyjnego od wartości napięcia zasilającego, a na Rys. 6.27 przedstawiono wykresy Arrheniusa otrzymane dla oleju izolacyjnego oraz preszpanu impregnowanego olejem izolacyjnym dla czterech badanych o zawartości wilgoci, dla wszystkich napięć zasilania z zakresu 20 V do 1000 V.

W rozdziale *siódmym* został przedstawiony opracowany w ramach realizacji rozprawy nowy sposób oceny stopnia zawilgocenia elementów stałych układów izolacyjnych papierowo-olejowych transformatorów elektroenergetycznych, który został opatentowany, a Doktorant jest jednym z sześciu jego współautorów.

**Rozdział 8** stanowi podsumowanie wyników prac naukowo-badawczych dotyczących problematyki zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej, jakie zostały wykonane w ramach rozprawy doktorskiej. W rozdziale tym Doktorant na podstawie uzyskanych i zaprezentowanych w rozprawie rezultatów sformułował szereg wniosków zarówno o charakterze ogólnym, jak również szczegółowym, które w sposób jednoznaczny potwierdzają założoną w rozprawie tezę. Przy czym, dwa pierwsze wypunktowane akapity nie są wnioskami ale stanowią syntetyczny opis zakresu zrealizowanych prac w ramach wstępnych etapów badań. W rozdziale tym brakuje mi wskazania przez Doktoranta propozycji dalszych możliwych kierunków prowadzenia prac naukowo-badawczych w podjętej w dysertacji tematyce.

Za najważniejsze w rozprawie uważam rozdziały **5, 6, 7**, w których zostały przedstawione wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analiz uzyskanych zależności.

**Reasumując, zaproponowany układ pracy jest czytelny, kolejne rozdziały tworzą logicznie połączoną oraz zamkniętą całość. Rozwiązywane w rozprawie problemy badawcze 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:**

- dokonanie syntetycznej oceny aktualnego stanu wiedzy dotyczącej poruszanej w rozprawie tematyki na podstawie przeglądu doniesień literaturowych, głównie w oparciu o publikacje zagraniczne;
- opracowanie i zbudowanie stanowiska do pomiarów rezystancji stałoprądowej izolacji papierowo-olejowej z wykorzystaniem metody PDC, przygotowanie planu badań doświadczalnych oraz wykonanie w oparciu o zaproponowaną procedurę próbek preszpanu o różnym stopniu zawilgocenia;
- określenie, na podstawie badań eksperymentalnych i analiz z wykorzystaniem elementów mechaniki kwantowej, zależności konduktywności preszpanu elektrotechnicznego impregnowanego olejem izolacyjnym od stopnia jego zawilgocenia i wartości temperatury;
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych, przy wykorzystaniu metody elektrycznej PDC, w celu określenia wpływu na konduktancję stałoprądową zawilgoconego, impregnowanego olejem transformatorowym preszpanu takich czynników, jak: zawartość wilgoci, temperatura oraz natężenie pola elektrycznego;
- wykonanie analizy porównawczej wartości konduktancji i energii aktywacji oleju izolacyjnego i preszpanu elektroizolacyjnego impregnowanego olejem;
- współautorskie opracowanie nowego sposobu szacowania zawartości wilgoci w składowej stałej izolacji transformatorów elektroenergetycznych, na podstawie wyników badań, który został opatentowany.

**W moim przekonaniu, przedstawione wyżej osiągnięcia Doktoranta uzasadniają jego kompetencje naukowe i rekomendują Go do stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej elektrotechnika, która odpowiada dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika według nowej kwalifikacji MNiSW.**

#### 4. Uwagi do rozprawy

Uwagi i zastrzeżenia dotyczące ocenianej rozprawy podzieliłem na dwie następujące grupy:

- uwagi merytoryczne (15),
- uwagi redakcyjne.

##### 4.1 Uwagi merytoryczne

1. W rozdz. 4.2 dysertacji Doktorant przedstawił charakterystykę stanowiska do badań stałoprądowych preszpanu elektrotechnicznego, opracowanego i zbudowanego w Katedrze Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Proszę o jednoznaczne sprecyzowanie wkładu własnego w utworzenie tego stanowiska. Ta sama uwaga dotyczy opracowania aplikacji komputerowej napisanej w środowisku C++, która była wykorzystywana do sterowania układem pomiarowym i archiwizacji danych podczas eksperymentów laboratoryjnych wykonywanych przez Doktoranta z wykorzystaniem metody PDS.

2. W dysertacji nie znalazłem usystematyzowanego opisu błędów i niedokładności pomiarów, wynikających z zastosowanej metody i układu pomiarowego, a na wykresach brakuje zaznaczenia niepewności pomiarów, która może wpływać na właściwą ocenę badanych zjawisk. Jeżeli nie było możliwe przeprowadzenie wystarczającej liczby pomiarów tak, aby określić rozkład gęstości prawdopodobieństwa, odchylenie standardowe lub inny parametr wyznaczony metodą typu A, to należało wykorzystać dane podawane w

specyfikacji przyrządów pomiarowych. Jak zatem należałoby oszacować czułość i dokładność proponowanej przez Autorkę metody ?

3. Czy Doktorant rozważał problem powtarzalności uzyskiwanych wyników pomiarowych, mając na uwadze ograniczoną liczbę próbek preszpanu, jak również sam proces ich suszenia, impregnacji i osiągnięcia równowagi termodynamicznej zawartości wilgoci oraz zewnętrznych czynników metrologicznych, które mogłyby ją zakłócać ?

4. Ponieważ w podsumowaniu rozprawy Doktorant nie przedstawił propozycji dalszych możliwych kierunków prowadzenia prac naukowo-badawczych, w zakresie tematyki podjętej w dysertacji, prosiłbym o odniesienie się do tej kwestii. Prosiłbym również o wskazanie możliwości wykorzystania uzyskanych w ramach realizacji rozprawy wyników w praktyce w badaniach diagnostycznych układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych.

5. Prosiłbym o jednoznaczne wskazanie wkładu własnego Doktoranta w opracowanie zgłoszenia patentowego, na podstawie którego Urząd Patentowy RP przyznał Patent nr 423879 zatytułowany „*Sposób oznaczenia zawartości wilgoci w elementach stałych układu izolacji ciekło-stałej transformatorów energetycznych*”, którego jest jednym z sześciu współautorów (np. w postaci udziału procentowego i merytorycznego). Mając także na uwadze, że w tekście dysertacji znajduje się stwierdzenie: „... *Z naszych badań wynika, że ...*” (str. 82).

6. Proszę o podanie, na jakiej podstawie dokonywano zaokrąglenia liczb przedstawianych, jako wyniki pomiarów doświadczalnych i odpowiednio wykonywanych obliczeń (sposób szacowania liczby miejsc znaczących po przecinku). Przy czym, dotyczy to wartości liczbowych prezentowanych zarówno w zestawieniach tabelarycznych, jak również prezentowanych bezpośrednio w tekście rozprawy.

7. W rozdz. 7.2 Doktorant napisał m.in., że przedstawiciele dwóch uczelni oraz pracownicy firmy OBRE Sp. z o.o. z Piekar Śląskich „... *wykonali zakrojone na szeroką skalę badania metodami PDC oraz FDS impregnowanego olejem izolacyjnym preszpanu o zawartości wilgoci od 1% wag. do 5% wag. w zakresie temperatur roboczych transformatorów ...*”, prosiłbym o przybliżenie informacji w tym zakresie, w szczególności dotyczących weryfikacji w warunkach rzeczywistej eksploatacji zaproponowanego sposobu oznaczania zawartości wilgoci w elementach stałych układu izolacji ciekło-stałej transformatorów energetycznych. Interesującą informacją jest wielkość populacji zbadanych jednostek transformatorowych, jak również sposób weryfikacji zawartości wilgoci w izolacjach uzyskanych innymi metodami diagnostycznymi.

8. Na Rys. 5.9 Doktorant zaprezentował wartości obliczone na podstawie danych doświadczalnych i linię ciągłą stanowiącą ich aproksymację, przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów. Wyznaczono również wartości współczynnika determinacji -  $R^2$ . Przy czym, zostały przedstawione punkty dla dwóch wartości temperatury, tj.: 297 K i 318 K. Zatem, dla jakich wartości została wyznaczona linia aproksymująca ?

9. W opisie merytorycznym dotyczącym zależności zilustrowanych na Rys. 5.1, który znajduje się w rozdz. 5.1 na str. 63 dysertacji Doktorant napisał, że „... *przedstawiono wybrane zależności czasowe prądu ładowania impregnowanego preszpanu o różnych wartościach zawilgoceniu X dla temperatury pomiaru  $T = 297\text{ K}$  ...*”, natomiast w tytule Rys. 5.1 znajduje się informacja: „... *Zależności czasowe logarytmu naturalnego natężenia prądu dla próbek preszpanu, zmierzone przy  $T = 318\text{ K}$  dla wybranych zawartości wilgoci ...*”. Zatem, która z wartości jest właściwa i jakie różnice byłyby w wyznaczonych przebiegach dla stałych wartości temperatury wnoszących odpowiednio:  $T = 297\text{ K}$  oraz  $T = 318\text{ K}$  ?

10. Doktorant w rozprawie konsekwentnie wykorzystuje aproksymację liniową wyników doświadczalnych, wyznaczając zależności przy zastosowaniu metody

najmniejszych kwadratów, podając każdorazowo wartość współczynnika determinacji  $R^2$ . Dlatego, prosiłbym o podanie jego wartości dla zależności energii aktywacji konduktywności od zawartości wilgoci zilustrowanej na Rys. 5.4. Czy Doktorant próbował dopasować inną krzywą do otrzymanych wartości? Proszę również o szerszy komentarz dotyczący zilustrowanej zależności, w szczególności dotyczy to sposobu aproksymacji, jakie wartości są przedstawione na wykresie, czy jest to średnia uzyskana dla dwóch wartości temperatur, jeżeli tak to jakich?

**11.** Brak konsekwencji w stosowaniu znaku oddzielenia części całkowitej i dziesiętnej liczb. Doktorant wykorzystuje wymiennie znak „.” (najczęściej na wykresach, z wyjątkami, np.: Rys. 3.8, 3.10, ) oraz znak „,” (najczęściej w tekście lub tabelach, z wyjątkami, np: str. 36, 80, 111). Występują też przypadki, że w jednym wyrażeniu jest zarówno znak przecinka, jak również znak kropki, np.: „... wynosi  $3.85 \pm 0,25$ , to znaczy że zmiany wynoszą około  $\pm 6,5\%$  ...” (str. 109) lub odpowiednio na Rys. 6.25, Rys. 6.27.

**12.** Proszę o wskazanie czym się różni (jeżeli jest jakaś różnica) wielkość oznaczona jako:  $W$  – uogólniona energia aktywacji przewodnictwa, eV (str. 10 oraz wzór 5.3 na str. 65, opis str. 66) od wielkości  $\Delta W$  określonej, jako energia aktywności konduktywności, eV (brak opisu w wykazie, wielkość przedstawiona na osi OY na rys. 5.4)?

**13.** Doktorant w tytule Rys. 5.1 (str. 63) wprowadza prąd przewodzenia -  $I_p$ , który nie występuje na schemacie zastępczym, a występuje na nim prąd  $I_R$  (brak w wykazie oznaczeń). Podobna sytuacja dotyczy opisu wielkości we wzorze 5.1 (str. 63), gdzie jest:  $R_p$  - rezystancja skrośna dielektryka, natomiast na Rys. 5.1 jest to rezystancja płytki preszpanu, a w zależności (5.1) występuje tylko wielkość oznaczona  $R_C$  (bez opisu, zarówno w tekście, jak również w wykazie oznaczeń). Proszę o odniesienie się Doktoranta do tych kwestii.

**14.** Czy na pewno właściwe jest cytowanie Rys. 3.8?

**15.** Inne oznaczenia zastosowane na Rys. 3.3 i w opisie merytorycznym zilustrowanych przebiegów.

## 4.2 Uwagi redakcyjne

W mojej ocenie rozprawa została zredagowana poprawnie i zawiera tylko nieliczne, błędy redakcyjne, interpunkcyjne, stylistyczne, niezręczności językowe, czy sformułowania nietechniczne, które zaznaczyłem bezpośrednio w tekście dysertacji. Przy czym, chciałbym podkreślić, że nie wpływają one na moją pozytywną ocenę merytoryczną recenzowanej dysertacji. Poniżej przedstawiłem kilka przykładów dostrzeżonych przeze mnie omyłek językowych:

- Doktorant posługuje się w pracy językiem technicznym, jednak nie ustrzegł się przed zastosowaniem w kilkunastu miejscach mało precyzyjnych zwrotów i sformułowań np.: „... niewielka ilość ...” (str. 13); „... dobre właściwości ...” (str. 22); „... przy niskich temperaturach (str. 27); „... małą kinetyką ...” (str. 36); „... zawiera bardzo dużą niepewność ...” (str. 38); „... w dłuższym okresie czasu ...” (str. 60) „... można z pewnym prawdopodobieństwem ...” (str. 68, 69); „... ruchliwość wchodzi do wzoru na konduktywność w sposób następujący...” (str. 68); itd.;
- W dysertacji dostrzegłem tylko kilka powtórzeń wyrazu w zdaniach, które można było w prosty sposób wyeliminować, np.: „Należy” (str. 32) , „badań” (str. 35); „zakłócenia” (str. 44); „rejestrują” (str. 47); „odpowiada” (str. 60); „pomiarów” (str. 61); itd.;
- Przykłady sformułowań niepoprawnych stylistycznie i niezręczności językowych: „... We wzór na  $tg\delta$  ...” (str. 15); „... ostatnio pojawiło się doniesienie ...” (str. 15); „... z krokiem w  $10^\circ C$  ...” (str. 17); „... Olej mineralny od wielu dziesięcioleci stosowany w tego typach izolacji ze względu na dużą dostępność jak również niski



*koszt produkcji ...*” (str. 21 brak orzeczenia w zdaniu); „... *znajomość materiału zdobyta ...*”(str. 28); „... *gdzie przebywa transformator ...*” (str. 42); „... *wykorzystywane napięcie podczas tej metody było ...*” (str. 44); „... *wartość prądu przez płytkę prespanu musi osiągnąć ...*” (str. 61); „... *w sposób podobny reaguje przebieg czasowy ...*” (str. 63); „... *o różnych wartościach zawilgoceniu ...*” (str. 63); „... *Od wielu dziesięcioleci uważano ...*” (str. 67); „... *na odległości r*” (str. 69); „... *szybkość spadania funkcji ...*” (str. 72); itd.;

- Występują również nieliczne tzw. „błędy literowe”, np.: jest: „*Temperatur*” (Rys. 3.1), a powinno być „*Temperatura*”, jest: „*na pojawie*” (str. 48), a powinni być: „*na pojawienie*”; jest: „*rośną*”, a powinno być „*rosną*” (str. 49); jest: „*roźnej*”, a powinno być: „*różnej*” (str. 49); jest: „*wiec*”, a powinno być: „*więc*” (str. 50); jest: „... *nie przekraczają granicznych ...*” (str. 53), brakuje wyrazu: „*wartości*”; jest: „*głownie*” (str. 54), a powinno być: „*głównie*”; jest: „*naturlanego*”, a powinno być: „*naturalnego*” (str. 75); jest: „*4% wroga*”( str. 98), jest: „... *Oznacza o*”, a powinno być: „... *Oznacza to ...*” (str. 109), itd.;
- W wielu miejscach dysertacji Doktorant posługuje się formą osobową, zamiast bezosobowo, jak ma to miejsce w tekstach technicznych, dla przykładu: „... *możemy zaliczyć ...*” (str. 20, 21, 22, itd.); „... *możemy ...*” (str. 20, 39, 40, 41, 44, 52, 53, itd.); „... *mamy ...*”(str. 32); „*wyróżniamy*” (str. 40); „*otrzymamy*” (str. 73); itd.;
- Doktorant w wielu miejscach dysertacji nie wykorzystuje znaku interpunkcyjnego „ , ”(przecinka), przed zaimkiem przysłówkowym: „*jak*” (str. 21, 24, 31, 35, 36, 38, 39, 41, 53, itd.); „*gdzie*” (str. 35, 42, itd. ); „*jakim*” (str. 35, 55, itd.); „*po którym*” (str. 60);
- W pracy znajduje się kilka błędów ortograficznych związanych z brakiem znaków diakrytycznych, np.: „*powierzchnie*” (str. 28); „*prace*” (str. 34); „*Miedzy*” (str. 40); „*stosuję*” (str. 48); oraz błąd w wyrażeniu: „*filtr przeciw cząsteczkowy*”.

Ponadto, w dysertacji można było wprowadzić powszechnie wykorzystywany w tekstach technicznych skrót Rys. w miejsce Rysunek, to samo dotyczy tabel. Przy czym w kilku miejscach pracy Doktorant wykorzystuje formę skrótową (np. str. 28);

**Podsumowując, zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia o charakterze merytorycznym oraz związane z redakcją dysertacji, nie wpływają w sposób znaczący na wartość naukową rozprawy. Jednak, proszę Doktoranta o odniesienie się do nich przed obroną. W związku z powyższym recenzowana praca nie wymaga zmian ani uzupełnień.**

## 5. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy aktualnego i oryginalnego zagadnienia naukowego o silnie zaznaczonym charakterze implementacyjnym. Uzyskane wyniki mają duże znaczenie poznawcze i naukowe, a także możliwość praktycznego zastosowania uzyskanych zależności w diagnostyce wykonywaną on-line układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych.

Założone przez Doktoranta cele rozprawy były konsekwentnie realizowane i w mojej ocenie zostały w pełni osiągnięte. Doktorant wykazał się zdolnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów o charakterze naukowym, dobrym opanowaniem wiedzy teoretycznej z zakresu szeroko rozumianej elektrotechniki, w tym elektroenergetyki, techniki wysokich napięć, materiałoznawstwa, metod diagnostycznych układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych oraz fizyki dielektryków stałych i ciekłych, mechaniki kwantowej, a także umiejętnością planowania oraz przeprowadzenia badań

eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych w opracowanym i zbudowanym układzie pomiarowym.

W mojej ocenie, przedłożona praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, określone w obowiązującej *Ustawie o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz stopniach i tytułach w zakresie sztuki*. Dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Lubelskiej w Lublinie, mgra inż. Konrada Kierczyńskiego do publicznej obrony przedłożonej rozprawy.

**Mając na uwadze, że Doktorant jest współautorem trzech artykułów naukowych opublikowanych w znaczących czasopismach międzynarodowych, w których prezentowane były wyniki uzyskane w ramach realizacji pracy doktorskiej oraz uzyskanie patentu, którego jest współtwórcą, a przede wszystkim wysoki poziom merytoryczny rozprawy, a także oryginalność i możliwość wdrożenia opracowanego sposobu wyznaczania stopnia zawilgocenia celulozy w diagnostyce układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych, zgłaszam wniosek o wyróżnienie recenzowanej pracy doktorskiej.**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ba' or similar, written in a cursive style.