

Szczecin, 8 września 2023 r.

dr hab. inż. **Szymon Banaszak**, prof. ZUT
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Elektryczny, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki
ul. Sikorskiego 37; 70-313 Szczecin
e-mail: szymon.banaszak@zut.edu.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. **Przemysław Rogalskiego**

pod tytułem: **“Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej stosowanej w transformatorach z wykorzystaniem modelu skokowej wymiany ładunków”**

Promotorem rozprawy jest dr hab. Paweł Żukowski, prof. PL

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Lubelskiej, prof. dr. hab. inż. Piotra Kisały z dnia 8.VIII.2023 r. oraz uchwała Rady Dyscypliny Naukowej AEEiTK Politechniki Lubelskiej z dnia 12.VII.2023 r.

1. Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych oceną stanu izolacji stało-ciekłej transformatorów energetycznych. Głównym zagadnieniem naukowym pracy jest opracowanie metodologii i przeprowadzenie badań i analiz zależności parametrów dielektrycznych układu izolacyjnego celuloza-olej w warunkach jego zawilgocenia przy wykorzystaniu nowatorskich metod badawczych. Recenzowana praca doktorska składa się z ośmiu rozdziałów, które można podzielić na część literaturową (rozdział 2) oraz badawczą (rozdziały 3-7). Dodatkowo zawarto w niej spis treści, streszczenie i angielskojęzyczny abstract, wykaz skrótów i oznaczeń, wstęp (oznaczony jako rozdział 1) oraz spis literatury (rozdział 8), który liczy 152 pozycje. Wszystkie pozycje literatury zostały w tekście zacytowane. Objętość pracy wynosi 152 strony.

We **wstępie** określono problematykę badawczą. Wskazano na znaczenie transformatorów energetycznych dla gospodarki i omówiono problem zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej, a także wprowadzono czytelnika w najczęściej stosowane zaawansowane metody diagnostyczne. Między innymi zwrócono uwagę na dwa zagadnienia, które są niedostatecznie zbadane w światowej literaturze, tj. sposób zawilgacania próbek preszpanu w badaniach laboratoryjnych oraz badania układu papier-olej dla jego dużych zawilgoczeń. Na podstawie tej analizy zdefiniowano trzy cele pracy. Pierwszy dotyczy opracowania sposobu nawilżania próbek w badaniach laboratoryjnych, identycznego jak w rzeczywistych układach

izolacyjnych transformatorów. Drugi i trzeci dotyczą wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowo-temperaturowych wzorcowych parametrów elektrycznych preszpanu i oleju izolacyjnego nawilżonych do poziomu 5%. Wynika z nich teza pracy: *„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”*. Uważam, że teza została sformułowana w sposób trafny i jest ambitna. W dalszej części wprowadzenia zdefiniowano zakres pracy, na który składa się 12 punktów. **Tematyka pracy i zaplanowane badania niewątpliwie wpisują się w zakres dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.**

Rozdział drugi zawiera przegląd literaturowy, w którym omówiono kolejno ciecze dielektryczne i ich właściwości fizykochemiczne i elektryczne, papier i preszpan oraz wpływ wilgoci na izolację papierowo-olejową. W dalszej części omówiono elektryczne metody diagnostyki układów izolacyjnych z uwzględnieniem zaawansowanych metod polaryzacyjnych. Omówiono szczegółowo metody RVM, PDC oraz FDS, a także chromatografię gazową. W zestawieniu tym brakuje mi opisanie pomiaru skojarzonego RVM+PDC, który zwiększa dokładność diagnostyki i umożliwia na przykład identyfikację osadów na izolacji stałej transformatora.

W **rozdziale trzecim** opisano obiekt badań stanowisko badawcze oraz podstawy analizy wyników. Opisano powszechnie stosowany sposób zawilgocenia próbek preszpanowych stosowany w badaniach laboratoryjnych, który polega na przenikaniu do nich wilgoci z atmosfery, po ich uprzednim wysuszeniu. Wskazano na niezgodność tego procesu z rzeczywistymi zjawiskami zachodzącymi w układach izolacyjnych transformatorów energetycznych i zaproponowano nowatorską metodę zawilgacania próbek, analogiczną do procesów zachodzących w transformatorach. Niestety metoda ta jest bardzo czasochłonna. Na potrzeby pracy przygotowano szereg takich próbek zawilgoconych do poziomu 5%. W dalszej części rozdziału opisano przygotowane na potrzeby badań stanowisko pomiarowe, na które składa się trój elektrodowy kondensator pomiarowy i układ stabilizacji temperatury. Do układu przyłączono przyrządy pomiarowe. Należy podkreślić, iż Doktorant wykonał na potrzeby badań specjalny układ sterowania temperaturą, który umożliwia także chłodzenie komory pomiarowej oraz sterowanie za pomocą programu komputerowego. W punktach 3.3 i 3.4 przedstawiono matematyczne podstawy analizy parametrów materiałowych izolacji papierowo-olejowej, z uwzględnieniem kwantowo-mechanicznego zjawiska tunelowania elektronów.

Kolejne trzy rozdziały zawierają wyniki badań i analizy przeprowadzone przez Doktoranta, stanowiąc najważniejszą treść pracy doktorskiej. **Rozdział czwarty** omawia pomiary zależności temperaturowo-częstotliwościowych konduktywności preszpanu impregnowanego olejem mineralnym. Badania realizowano przy zawilgoceniu do poziomu 5%. Przedstawiono wyniki badań konduktywności stało- i zmiennoprądowej w zakresie temperatur od 293,15 K do 333,15 K. W analizach wykorzystano model przewodności kwantowo-mechanicznego zjawiska tunelowania elektronów. Uzyskane wyniki pokryły się z rezultatami symulacji komputerowych. Wykazano, iż konduktywność zmiennoprądowa w

zakresie ultraniskich częstotliwości dąży do wartości konduktywności stałoprądowej. Następnie określono temperaturową zależność wartości oczekiwanej czasu relaksacji oraz określono energię aktywacji wartości oczekiwanej czasu relaksacji. Wykorzystując zależności Arrheniusa przeanalizowano wpływ konduktywności na wartości energii aktywacji czasu relaksacji konduktywności oraz wpływ częstotliwości na wartości energii aktywacji konduktywności. Doktorant zauważył brak wpływu energii aktywacji czasu relaksacji na konduktywność niskoczęstotliwościową, co umożliwiło przesunięcie przebiegów konduktywności zmiennoprądowej do wartości konduktywności zmierzonej w temperaturze 293,15 K przy częstotliwości 10^{-4} Hz. Uzyskane wyniki pokryły się (wykres 4.14), co jest bardzo ciekawym rezultatem badań. W efekcie wykazano, iż kształt przebiegów konduktywności zależy od zawartości wilgoci, a położenie przebiegów w układzie podwójnie logarytmicznym zależy jedynie od temperatury. W podsumowaniu wskazano, że energia aktywacji konduktywności wpływa na przesunięcie przebiegów konduktywności wzdłuż osi rzędnych (oś konduktywności), a energia aktywacji czasu relaksacji wpływa na przesunięcie tych przebiegów wzdłuż osi częstotliwości. **Rozdział piąty** zawiera wyniki pomiarów zależności częstotliwościowo-temperaturowych przenikalności i stratności dielektrycznej preszpanu impregnowanego olejem mineralnym. Badania realizowano przy zawilgoceniu do poziomu 5%. W oparciu o dane pomiarowe wykreślono przebiegi Arrheniusa, a na ich podstawie określono energię aktywacji czasu relaksacji przenikalności elektrycznej. Umożliwiło to przesunięcie przebiegów częstotliwościowej zależności przenikalności elektrycznej dla wszystkich temperatur do temperatury odniesienia 293,15 K. Przebiegi te pokryły się, podobnie jak dla badań zaprezentowanych poprzednim rozdziale. Wyciągnięto na tej podstawie wnioski, iż kształt przebiegów przenikalności elektrycznej impregnowanego olejem preszpanu zależy od obecności wilgoci. Następnie Doktorant określił wartości oczekiwane czasu relaksacji elektrycznej oraz energię aktywacji czasu relaksacji stratności uzyskując wartości zgodne z energią aktywacji czasu relaksacji konduktywności. Wykorzystując przebiegi Cole-Cole'a wykazano, że w zakresie wysokoczęstotliwościowych zmian polaryzacji występuje relaksacja typu Cole-Cole i określono jej parametry. W wyniku dalszych analiz wykazano, że do uzyskania wartości doświadczalnej przenikalności elektrycznej preszpanu impregnowanego olejem mineralnym o zawilgoceniu 5%, zawartość wilgoci powinna wynosić 27% wagowo, to jest ponad 5 razy więcej niż w rzeczywistości. Tym samym wykluczono możliwość występowania w preszpanie ciekłej wody, co jest bardzo ważnym wnioskiem. Dodatkowo potwierdzono te obserwacje w oparciu analizę czasu relaksacji przenikalności elektrycznej preszpanu i wytłumaczono za pomocą kwantowo-mechanicznego zjawiska tunelowania pomiędzy nanokroplami wody. W **rozdziale szóstym** przedstawiono wyniki badań zależności częstotliwościowo-temperaturowych tangensa kąta strat modelu układu izolacyjnego XY transformatorów energetycznych, wykonanego z impregnowanego olejem mineralnym preszpanu. Ponownie badania realizowano przy zawilgoceniu 5%. W pierwszym etapie badań dopasowanie krzywych symulowanych do danych pomiarowych oparto na rzeczywistych parametrach układu izolacyjnego i temperaturze. Uzyskane wyniki nie pokrywały się z danymi pomiarowymi. Dlatego w kolejnym etapie do oprogramowania miernika Dirana wprowadzono jedynie temperaturę, umożliwiając jego oprogramowaniu dobrać wartości parametrów XY. Dzięki temu uzyskano większą zgodność z danymi pomiarowymi. W dalszej części rozdziału Doktorant

przeprowadził badania konduktywności i tangensa kąta strat dielektrycznych oleju nowego i zawilgoconego. Podobnie jak w przypadku badań preszpanu, Doktorant opracował nowy sposób nawilżania oleju, który jest analogiczny do zjawisk zachodzących w rzeczywistych transformatorach. Analizując wyniki zwrócono uwagę na występowanie dwóch mechanizmów przewodnictwa w nowym oleju. Analizując wartości energii aktywacji konduktywności oleju nowego i nawilżonego oraz wartości energii aktywacji dyfuzji wody między olejem a preszpanem, wyciągnięto wnioski, iż wzrost energii aktywacji konduktywności nawilżonego oleju wynika ze wzrostu zawartości wody, co jest efektem dyfuzji molekuł wody z preszpanu do oleju przy wzroście temperatury układu izolacyjnego.

Rozdział siódmy zawiera wnioski końcowe i podsumowanie rozprawy doktorskiej, które podzielono na osiem punktów. Pierwszy z nich dotyczy nowatorskiej i opatentowanej metody nawilżania preszpanu w sposób identyczny z procesami zachodzącymi w transformatorach energetycznych. Uważam, że jest to ważne osiągnięcie Doktoranta. Punkt drugi podsumowuje opracowanie stanowiska badawczego i opracowanie metodologii pomiarów, które wykonywano ze zwiększoną rozdzielczością w porównaniu do standardowych badań opisywanych w literaturze. W punkcie trzecim podsumowano pomiary częstotliwościowo-temperaturowe konduktywności preszpanu impregnowanego olejem mineralnym o zawartości wody około 5%. W analizie danych wykorzystano model kwantowo-mechaniczny przewodności skokowej i określono energię aktywacji czasów relaksacji i konduktywności. Punkt czwarty podsumowuje pomiary i analizę częstotliwościowo-temperaturowych zależności przenikalności zawilgoconego preszpanu, z wykorzystaniem zależności Cole-Cole'a. W punkcie piątym wyjaśniono zjawiska zawilgocenia izolacji celulozowej, wykluczając możliwość występowania w preszpanie wody w stanie ciekłym. Analiza ta również stanowi bardzo ważne osiągnięcie Doktoranta. Punkt szósty podsumowuje badania układu XY za pomocą oprogramowania miernika Dirana. Wykazano istotny wpływ parametrów kanału olejowego na jakość uzyskiwanych oszacowań zawilgocenia układu izolacji papierowo-olejowej. Punkt siódmy opisuje nowy sposób nawilżania oleju, który podobnie do nawilżania celulozy oparty jest na mechanizmach zachodzących w rzeczywistych układach izolacyjnych. W punkcie ósmym zawarto wnioski z badania zależności częstotliwościowo-temperaturowych konduktywności oraz stratności izolacyjnego oleju nowego i zawilgoconego. **Na podstawie powyższych podsumowań stwierdzono, iż cele pracy zostały osiągnięte, a teza pracy została udowodniona. Całkowicie zgadzam się z tym twierdzeniem. Doktorant wykazał się umiejętnością pracy naukowej, poczynając od przygotowania podstaw teoretycznych, przez planowanie i przeprowadzenie eksperymentów naukowych, a kończąc na analizie uzyskanych wyników i trafnym formułowaniu konkluzji.**

2. Uwagi ogólne

Praca w części teoretycznej zawiera bogaty przegląd literatury, dotyczący analizowanych zjawisk w izolacji stało-ciekłej transformatorów. Cele pracy i teza zostały jasno określone i poparte analizą obecnego stanu wiedzy. Część eksperymentalna zawiera interesujące wyniki i analizy. Wykazano istniejące ograniczenia w zakresie badania papierowo-olejowych układów izolacyjnych i zaplanowano badania, które te luki wypełniły. Jest to aktualny problem badawczy, wpisującym się w zakres dyscypliny AEEiTK. Zawarte wyniki

eksperymentalne i analizy teoretyczne oraz wyciągnięte wnioski udowadniające postawioną w pracy tezę stanowią niewątpliwą wkład w tę dyscyplinę nauki. Poniżej przedstawiam uwagi do dyskusji i pytania, które wymagają wyjaśnienia przez doktoranta w odpowiedzi na recenzję, z których wybrane doktorant omówi podczas obrony:

- 2.1. Ważnym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie nowego sposobu zawilgacania próbek preszpanu, który odpowiada zjawiskom zachodzącym w rzeczywistych układach izolacyjnych transformatorów energetycznych. Dotychczas stosowane metody opierały się na absorpcji wilgoci z powietrza, w badaniach prezentowanych w pracy wilgoć przenika do badanych próbek poprzez olej izolacyjny. Nie przedstawiono jednak porównania efektów obu mechanizmów zawilgacania, np. poprzez zbadanie próbek przygotowanych na oba sposoby. Proszę o komentarz, jak sposób zawilgacania próbki wpłynie na uzyskiwane wyniki.
- 2.2. Nowy sposób zawilgacania próbek jest czasochłonny, cały proces trwał ponad 18 miesięcy. Jak okres ten zależy od oczekiwanego poziomu zawilgocenia próbki? Czy dla niższych zawartości wody czas nawilżania próbki będzie krótszy? Jak kontrolować ten proces, aby wykonać badania dla oczekiwanego poziomu zawilgocenia i czy da się zaplanować czas zawilgacania?
- 2.3. W części eksperymentalnej pracy przedstawiono wyniki uzyskane na próbkach preszpanu impregnowanego olejem o zawartości wilgoci na poziomie 5%. Dlaczego nie wykonano takich badań dla mniejszych stężeń wilgoci, co umożliwiłoby odniesienie się do danych literaturowych? Czy Doktorant planuje takie badania wykonać w przyszłości?
- 2.4. Na rys. 4.1 przedstawiono natężenie prądu polaryzacji funkcji czasu dla szeregu temperatur impregnowanego olejem mineralnym preszpanu. Poniżej doktorant napisał, iż natężenie prądu polaryzacji osiąga wartość ustaloną wraz z upływem czasu. Nie wynika to jednak z kształtu zaprezentowanych na wykresie krzywych. Proszę o komentarz.
- 2.5. Wykorzystany do badań w układzie XY preszpan miał grubość jednego milimetra (walec oraz pierścień). Takie próbki, wraz z zastosowanym kondensatorem pomiarowym, są powszechnie stosowane w podobnych badaniach. W pracy brakuje komentarza czy tak uzyskane wyniki badań są zgodne ze zjawiskami zachodzącymi w rzeczywistych układach izolacyjnych transformatorów. Czy rozmiar badanego układu XY mógł wpłynąć na błędne szacowanie zawilgocenia oprogramowaniu miernika Dirana?
- 2.6. Czy w badanym układzie XY nie występowało ryzyko odkształcenia się jednomilimetrowej próbki preszpanowego walca, które skutkowałyby obecnością warstwy oleju również pod tą próbką? Mogłoby to mieć wpływ na wyniki badań.

3. Uwagi szczegółowe

Poziom edytorski pracy jest wysoki. Występują nieliczne literówki i błędy edytorskie czy też błędy interpunkcyjne, a także jeden błąd ortograficzny. Poniżej przedstawię najważniejsze ich przykłady:

- literówka: s. 13 „...po osiągnięci zawartości...”;

- błędy interpunkcyjne: s. 13, brak przecinka „...się w oleju by następnie...”; s.14, zbędne przecinki „*Takie badania wykonano, w szeregu prac, patrz, na przykład...*”, s.14, brak przecinka „*próżniowemu a następnie*”, przecinek w złym miejscu, s.25 „*który, ma...*”, itd.
- odmiana nazwisk autorów publikacji, s.14 „...*pracowników UoS, M. Koch i S. Tenbohlen...*”;
- stosowanie słowa „*sylikonowych*” zamiast „*silikonowych*”, str. 18 i dalej w pracy;
- błędy edytorskie, s.24, zbędny „enter” w linii 9;
- za małe czcionki na niektórych wykresach, np. rys. 2.7, 2.17, 2.34, 6.5, 6.6;
- rys. 4.3, pomyłka w opisie osi x, „*h, Hz*”;
- błąd ortograficzny, s. 120 „...*durze zmiany...*”.

Powyższe uwagi natury redakcyjnej nie obniżają poziomu merytorycznego pracy, stronę edytorską pracy niezmiennie oceniam bardzo dobrze.

4. Ocena ogólna i podsumowanie

Praca doktorska stanowi ważne osiągnięcie naukowe autora. Główne cele naukowe oraz badawcze zostały zrealizowane, a uzyskane wyniki posłużyły do wyciągnięcia wartościowych wniosków, które mogą znaleźć znaczenie w praktyce przemysłowej. Dotyczy to zarówno zaproponowanych metod zawilgacania próbek preszpanu oraz oleju izolacyjnego, a także wykorzystania uzyskanych danych wzorcowych w ocenie rzeczywistych układów izolacyjnych transformatorów energetycznych. Uważam, że jednoznacznie wykazano w pracy udowodnienie postawionej tezy. Przeprowadzenie badań (i ich wcześniejsze przygotowanie) wymagało od autora dużego nakładu pracy i staranności badawczej. Analiza wyników poparta została solidnymi podstawami teoretycznymi i doprowadziła do wartościowych konkluzji.

Uważam rozprawę za ważny wkład do badań nad zjawiskami zachodzącymi w izolacji stało-ciekłej transformatorów, a wszystkie wnioski naukowe za pomocne w ich diagnostyce. Stwierdzam, że cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte, a autor wykazał się umiejętnościami planowania i przeprowadzania eksperymentów i analizy uzyskanych wyników oraz rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Praca niewątpliwie stanowi rozwiązanie zagadnienia naukowego w tej dyscyplinie. Pomimo zgłoszonych przeze mnie uwag o charakterze dyskusyjnym, praca mgr. inż. Przemysława Rogalskiego jednoznacznie spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenia doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

