

Łódź, 09.06.2023

dr hab. inż. Paweł Różga, prof. uczelni
Politechnika Łódzka
Instytut Elektroenergetyki
pawel.rozga@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Kamila Lewandowskiego „*Zjawisko bąbelkowania w nowoczesnych układach izolacyjnych transformatorów energetycznych*”

1. Podstawa prawna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja sporządzona została na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej, prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego z dnia 24.04.2023 roku powołującego się na uchwałę Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej z dnia 18.04.2023 roku.

2. Tematyka i teza rozprawy

Rynek cieczy dielektrycznych do zastosowań elektrycznych, a także wysokowydajnych materiałów dielektrycznych stałych (papier i preszpan) do zastosowań w transformatorach energetycznych rozwija się w ostatnich latach w szybkim tempie dając do dyspozycji projektantów transformatorów oraz ich producentów wiele nowych rozwiązań. Rozwiązania te, różnią się jednak od siebie, a to ze względu na fakt, że poszczególne ciecze oraz materiały izolacyjne stałe charakteryzują się odpowiednio odmiennymi względem siebie właściwościami fizykochemicznymi. W każdym przypadku nowy materiał zastosowany w urządzeniu wymaga szeregu badań, aby móc ocenić go z różnych perspektyw. Oczywiście każdy nowy materiał izolacyjny wprowadzany na rynek (zarówno ciekły jak i stały) spełnia wymagania przypisanych mu standardów, jednakże w czasie eksploatacji istnieje duża grupa czynników, które wpływają na właściwości funkcjonalne materiałów, a nie są weryfikowane na etapie dopuszczenia materiałów do użytkowania. W tym zakresie należy zwrócić szczególną uwagę na fakt braku weryfikacji zachowania się w warunkach eksploatacyjnych układów mieszanych dielektryków wykorzystywanych w konstrukcji układu izolacyjnego urządzenia elektroenergetycznego. Przykładem takiego stanu rzeczy jest współpraca izolacji ciekłej i stałej transformatorów. Brak jednoznacznych wytycznych weryfikujących tę współpracę powoduje, że często nowe rozwiązania przysparzają nowych problemów w eksploatacji. Na przeciw problematyce weryfikacji różnych



stanów eksploatacyjnych układów izolacyjnych transformatorów energetycznych nowego typu wychodzą naukowcy, proponując szeroki zakres badań w różnych obszarach tematycznych. W literaturze można spotkać wyniki badań dotyczących np. wpływu cieczy impregnującej na wytrzymałość elektryczną materiałów dielektrycznych stałych, wpływu cieczy na procesy starzeniowe oceniane z wykorzystaniem wymuszonego temperaturą procesu przyspieszonego starzenia czy badania napięcia inicjacji wyładowań niezupełnych w układach izolowanych elektrod (np. typu oil-wedge). We wszystkich tych przypadkach wysuwane są hipotezy mówiące o tym, że testy w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków panujących w transformatorze lepiej oddają właściwości materiałów izolacyjnych. Z hipotezami tymi nie sposób się nie zgodzić, szczególnie, że, w wielu przypadkach, w badania prowadzone w jednostkach naukowych zaangażowani są przedstawiciele przemysłu transformatorowego lub instytucji zarządzających jednostkami transformatorowymi.

W wyżej wymieniony obszar badań znakomicie wpisuje się tematyka poruszona w pracy doktorskiej mgr inż. Kamila Lewandowskiego pt. „Zjawisko bąbelkowania w nowoczesnych układach izolacyjnych transformatorów energetycznych”. Doktorant postanowił bowiem w ramach swojej pracy zbadać wpływ wybranych nowoczesnych materiałów izolacyjnych stosowanych w układach izolacyjnych transformatorów energetycznych na inicjację zjawiska bąbelkowania (bubble effect – *b.e.*), które to zjawisko jest niepożądanym zjawiskiem mogącym wystąpić w transformatorze w eksploatacji i prowadzić do zainicjowania wyładowań elektrycznych prowadzących dalej do wystąpienia przebiecia i trwałego uszkodzenia izolacji stałej. Zjawisko bąbelkowania dotyczy przede wszystkim układów zestarzonych, a więc transformatorów o długim okresie eksploatacji bądź pracujących z obciążeniem powyżej nominalnego. Inicjacja powoduje uwalnianie, najczęściej gwałtowne, pary wodnej z izolacji stałej i związana jest z przekroczeniem krytycznej temperatury zwanej temperaturą inicjacji zjawiska bąbelkowania. Wśród materiałów, jakie doktorant rozważył w pracy, są klasyczne materiały stosowane w układach izolacyjnych transformatorów na szeroką skalę jak papier celulozowy typu Kraft oraz olej mineralny, a także materiały o charakterze materiałów alternatywnych jak ester syntetyczny jako ciecz izolacyjna oraz materiały z grupy wysokotemperaturowych materiałów elektroizolacyjnych stałych bazujące na aramidzie. Doktorant podjął się zadania zweryfikowania *b.e.* dla różnych konfiguracji materiałów, co pozwala na względnie szerokie podejście do problemu i umożliwia wyciągnięcie wniosków o charakterze praktycznym dla przemysłu transformatorowego. Dodatkowo, uwzględnił także w swojej pracy różny stopień zawilgacania się badanych typów izolacji stałej, które przygotowywane były do badań w tych samych warunkach klimatycznych.

Doktorant zaproponował następującą tezę pracy: „*Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w złożonych układach izolacyjnych zależy w istotny sposób od polarności komponentów tworzących układ izolacyjny*”,

wraz z jej rozwinięciem w postaci trzech tzw. podtez:

- 1) *Zastąpienie celulozy aramidem, który jest materiałem o mniejszej polarności, powinno powodować obniżenie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania.*
- 2) *W układzie izolacyjnym aramid-dielektryk ciekły zastąpienie oleju mineralnego estrem syntetycznym powinno powodować wzrost temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania.*
- 3) *Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiałach stanowiących kompozycję włókien aramidowych i celulozowych powinna być wyższa niż w materiałach zawierających tylko włókna celulozowe albo aramidowe*

Drogą do udowodnienia postawionej tezy i podtez stały się wyżej już przytoczone założenia dotyczące zakresu prac badawczych planowanych do realizacji na autorskim stanowisku badawczym z wykorzystaniem specjalnie do tego celu przygotowanych modeli stanowiących tzw. obiekty badawcze.

Podsumowując, podjęta przez doktoranta tematyka pracy, przyjęta teza rozprawy wraz z trzema podtezami, a także bliski zagadnieniom praktycznym i przemysłowym charakter prac zaplanowanych do realizacji, spełniają bez wątpienia wymagania stawiane pracom doktorskim i wskazują jednoznacznie na oryginalne podejście do rozwiązania zagadnienia, które nie było realizowane dotychczas w takiej formie. Praca ma odniesienie do rzeczywistych problemów gospodarki z obszaru Energetyki, dla której niezawodność urządzeń eksploatowanych w systemach elektroenergetycznych jest niezwykle ważnym zagadnieniem z punktu widzenia zarządzania dostawami energii elektrycznej do odbiorców końcowych. Predykcja możliwych stanów mogących wystąpić w transformatorach, jako najważniejszych urządzeniach zainstalowanych w sieciach elektroenergetycznych, jest tu elementem, który należy bez wątpienia podkreślić.

3. Dane bibliograficzne rozprawy

Rozprawa opracowana została w języku polskim i zawiera 120 stron. Podzielona została na 5 zasadniczych rozdziałów poprzedzonych krótkimi streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz zakończonych spisem literatury zawierającym 113 pozycji. Układ poszczególnych rozdziałów jak i ich podział jest logiczny i nie wzbudza żadnych wątpliwości. Liczne tabele i rysunki ilustrujące dokonania doktoranta są przedstawione czytelnie z odpowiednimi przywołaniami pozycji literaturowych w sytuacji, gdy było to konieczne.

4. Charakterystyka i ocena rozprawy

Recenzowana praca doktorska podejmuje istotny dla elektroenergetyki temat zastosowania w transformatorach energetycznych nowoczesnych materiałów izolacyjnych o właściwościach innych niż klasyczne rozwiązania jak papier celulozowy czy olej mineralny. Jak wspomniano wyżej, każdorazowe wprowadzenie do układu izolacyjnego transformatora nowego materiału izolacyjnego niesie za sobą konieczność weryfikacji różnych zjawisk mogących wystąpić w transformatorze podczas jego eksploatacji. Doktorant postawił sobie za cel zweryfikowania jednego z takich zjawisk tj. zjawiska bąbelkowania dla różnych konfiguracji materiałów izolacyjnych ciekłych i stałych.

Część badawczą pracy poprzedziło dosyć obszerne wprowadzenie teoretyczne zamknięte w rozdziale 2 pracy zatytułowanym „Wybrane zagadnienia dotyczące izolacji transformatorów energetycznych”. Myślę, że dodanie słowa „olejowych” przed słowem „transformatorów” uściśliłoby zakres tematyczny opisany w tym rozdziale i lepiej oddało jego charakter, gdyż w przedstawionym opisie doktorant skupił się tylko na zagadnieniach związanych z tzw. olejowymi transformatorami energetycznymi. W kolejnych podrozdziałach doktorant opisał układ izolacyjny transformatora olejowego i stosowane do jego budowy materiały dielektryczne ciekłe i stałe wraz z krótką charakterystyką problematyki starzenia izolacji stałej i zmiany przenikalności elektrycznej w kontekście zjawisk adsorpcji i desorpcji wody. Następnie omówił problematykę zawilgocenia układu izolacyjnego typu izolacja stała - izolacja ciekła kończąc rozważania teoretyczne na najistotniejszym z punktu widzenia pracy zagadnieniu, tj. zjawisku bąbelkowania. Rozważania doktoranta w tym zakresie podsumowane zostały stwierdzeniem o niedostatecznej wiedzy i braku danych odnośnie zjawiska bąbelkowania w nowoczesnych materiałach wysokotemperaturowych, co ukierunkowało jego zainteresowania naukowe na ten właśnie obszar. Część teoretyczną pracy należy uznać za w pełni zadowalającą. Dobór materiału do tej części jest prawidłowy i kompletny; mimo jego obszerności trudno byłoby wskazać materiał niepotrzebny z punktu widzenia zakresu pracy. Należy więc w tym miejscu pogratulować doktorantowi sprawnego wprowadzenia czytelnika w aspekty praktyczne. W obszarze części teoretycznej pojawiły się oczywiście drobne niedociągnięcia, które wskazane zostaną w dalszej części recenzji jako uwagi, ale mają one charakter pomijalny w kontekście oceny całościowej rozprawy

W rozdziale 3 doktorant formułuje przytoczoną już wyżej tezę pracy oraz jej cel i zakres by następnie przejść do części zasadniczej pracy tj. rozdziału 4. W tej części zawarte są wyniki autorskich prac doktoranta, a więc „clue” rozprawy doktorskiej podlegające krytycznej ocenie.

Rozdział rozpoczyna się od definicji obiektu badań (podrozdział 4.1.), a następnie dokładnego opisu sposobu przygotowania próbek i przesłanek decydujących o wyborze sposobu prowadzenia badań i rejestracji parametrów mierzonych w czasie prowadzenia eksperymentu.

Doktorant zwizualizował fotograficznie elementy obiektu (patrony bez otuliny izolacyjnej oraz gotowe obiekty), jak również przedstawił dokładnie aparaturę zastosowaną do przygotowania próbek. Szczególnie ciekawy jest opis sposobu przeprowadzania procesu zawilgocenia próbek badanych materiałów wskazujący na ekspercką wiedzę doktoranta w tym zakresie - przykładowo doktorant zwraca uwagę na problematykę przygotowania próbek o niskim poziomie zawilgocenia z użyciem dostępnej komory klimatycznej. Z opisu wynika również, że doktorant posiada wiedzę dotyczącą wpływu rodzaju materiału na możliwości jego zawilgacania. Wskazuje to wysoką wiarygodność otrzymanych w ramach eksperymentu wyników, gdyż kluczowym aspektem w tego typu procedurze pomiarowej jest odpowiednie przygotowanie materiału badawczego. Podrozdział traktujący o obiekcie badawczym podsumowuje tabela 4.6 zestawiająca, jak zakłada recenzent, całkowitą liczbę rozpatrywanych przypadków badawczych.

W kolejnej części pracy (podrozdział 4.2) doktorant równie szczegółowo przedstawia stanowisko badawcze i procedurę pomiarową – kolejne istotne elementy decydujące o wiarygodności otrzymanych wyników. Stanowisko badawcze jest przedstawione schematycznie jak i zwizualizowane stosownymi fotografiami pokazującymi całość stanowiska jak i pojedyncze instrumenty pomiarowe. W podrozdziale 4.3 doktorant zwraca uwagę na konieczność pomiaru przenikalności dielektrycznej materiałów badanych jako miary polarności i przedstawia wyniki samodzielnie wykonanych pomiarów w tym zakresie uwzględniając zarówno materiały w stanie suchym jak i po procesie impregnacji. Dane zestawione w tabeli 4.6 (doktorant powielił numerację z tabeli wcześniejszej) podsumowują uzyskane wyniki. Badania zasadnicze zostały omówione natomiast w podrozdziałach 4.4 (suche przedstawienia wyników) i 4.5 (ich dyskusja z punktu widzenia porównania badanych materiałów ze sobą w aspekcie temperatury inicjacji zjawiska *b.e.*). Wyniki zwizualizowano graficznie jako krzywe przedstawiające zależności temperatury inicjacji zjawiska *b.e.* od poziomu zawilgocenia próbek wyrażonych w %. Doktorant pokazał również przykłady fotografii wykonanych podczas badań pokazujących rzeczywisty efekt bąbelkowania. Dyskusja wyników porównująca ze sobą poszczególne konfiguracje materiałów jest przeprowadzona wnikliwie i z różnej perspektywy. Autor nie ograniczył się tylko do oceny porównawczej wpływu względnej zawartości wilgoci w materiale stałym na temperaturę inicjacji *b.e.*, gdzie uzyskał względnie jednoznaczne wyniki dla obu cieczy tj. wyższą temperaturę inicjacji zjawiska *b.e.* w przypadku papieru celulozowego, ale także rozpatrzył sytuację, gdy materiały kondycjonowane były w tych samych warunkach, a efektem tego był różny poziom zawilgocenia izolacji stałej. W takiej sytuacji, wskazanej przez doktoranta jako bliższej zagadnieniom praktycznym (prawidłowo uzasadnionej), otrzymane wyniki można uznać jako bardzo zbliżone do siebie, gdy rozpatrujemy daną ciecz dielektryczną, a różne materiały izolacyjne stałe. Powyższe wskazuje na zrozumienie istoty problemu badawczego poruszanego przez doktoranta i zasługuje na

bardzo pozytywną ocenę. Finalnie doktorant porównuje wyniki z punktu widzenia cieczy izolacyjnej przy zastosowaniu tego samego materiału izolacyjnego stałego. Tu jednoznacznym wnioskiem jest nieco wyższa temperatura inicjacji b.e. dla materiału zaimpregnowanego estrem syntetycznym, a źródłem takiego stanu rzeczy jest, powtarzając za doktorantem, wyższa przenikalność dielektryczna estru. Doktorant w podrozdziale 4.5.3 pokusił się także o zestawienie równań krzywych logarymicznych uzyskanych z eksperymentu dla poszczególnych przypadków. Dla oleju mineralnego i papieru celulozowego wynik doktoranta jest bliski danym literaturowym, co potwierdza poprawność przeprowadzonego eksperymentu. Z powyższego należy uznać, że dla pozostałych rozpatrywanych przypadków (których nie sposób znaleźć w literaturze) uzyskane krzywe należy również traktować jako w pełni wiarygodne. Jest to więc niewątpliwy autorski wkład doktoranta w obszar wiedzy dotyczący zjawiska b.e. w układach izolacyjnych izolacja stała – izolacja ciekła. Podrozdział kończący analizę wyników dotyczy zestawienia wyników autora z wartościami dopuszczalnymi wg. IEC 60076-14 w zakresie temperatury pracy wysokotemperaturowych układów izolacyjnych. Poprzez takie zestawienie autor pokazuje, że wyniki jego pracy mogą mieć też znaczenie w praktyce inżynierskiej. Jednoznacznie widać, że otrzymane temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiałach o podwyższonej klasie termicznej zdają się być na granicy w przypadku zastosowania półhybrydowych i miesznych hybrydowych rozwiązań układu izolacyjnego transformatora. Jest to wniosek konieczny do rozpatrzenia przez „przemysł transformatorowy”.

Podsumowując, uzyskane przez doktoranta wyniki są oryginalne i wnoszą bezsprzecznie wkład w obszar badawczy dotyczący materiałów izolacyjnych stosowanych w transformatorach energetycznych o tzw. izolacji papierowo-olejowej. Doktorant dzięki szerokiemu zakresowi badań eksperymentalnych i wnikliwej analizie wyników udowodnił tezę postawioną w pracy. Rozprawę doktorską mgr inż. Kamila Lewandowskiego należy uznać za spełniającą z nadmiarem kryteria dotyczące prac doktorskich z obszaru szeroko rozumianej Energetyki.

5. Uwagi, pytania, zagadnienia dyskusyjne

Praca zawiera niewielką liczbę błędów natury edytorsko-stylistycznej. Praca jest napisana poprawną polszczyzną, a jej edytorska strona jest na bardzo dobrym poziomie. W kontekście zagadnień merytorycznych recenzent nie ma także uwag wymagających od doktoranta istotnych wyjaśnień. Przedstawione uwagi mają raczej charakter dyskusyjny, którego celem jest uściślenie pewnych aspektów, a także uzupełnienie pewnych obszarów, które nie do końca zostały w tekście pracy wyjaśnione.

5.1. Uwagi dotyczące aspektu edytorsko-stylistycznego pracy

W tekście pracy pojawia się minimalna liczba błędów typu „literówki” i z tego powodu nie zostały one tu przytoczone. Podobnie trudno doszukać się tu błędów natury interpunkcyjnej czy stylistycznej. Podanych zostało tylko kilka ogólnych uwag, jednak o niskiej wadze w kontekście ogólnej oceny pracy.

- 1) Numeracja Tabeli 4.6 powtarza się (str. 73 i 80).
- 2) Podobnie jak wyżej, w tekście pracy dwukrotnie występuje rozdz. 4.5 (to samo dotyczy spisu treści).
- 3) Margines lewy jest większy niż margines prawy, co przy dwustronnym druku pracy powoduje, że wizualnie strony parzyste i nieparzyste mają inny margines zewnętrzny.
- 4) Pojedyncze rysunki pochodzące z literatury i uwzględnione w części teoretycznej pracy nie zawsze mają dobrą jakość graficzną (2.19, 2.20, 2.21).

5.2. Uwagi dotyczące kwestii merytorycznych – pytania i zagadnienia do dyskusji oraz pytania otwarte.

Poniżej przedstawionych zostało kilka uwag, sugestii czy pytań otwartych, które narzuciły się recenzentowi podczas lektury rozprawy doktorskiej:

- 1) Na stronach 16-17 doktorant pisze o estrach syntetycznych i naturalnych wskazując wśród tych drugich płyn BIOTEMP i dodatkowo podając jego parametry w tabeli 2.3. Uwzględniając czas powstawania ocenianej pracy uważam, że umieszczanie parametrów płynu BIOTEMP, który nie jest już płynem będącym w produkcji, jest błędem. Myślę, że bardziej na miejscu byłoby podanie parametrów płynu FR3, najpowszechniej stosowanego obecnie w praktyce przemysłowej estru naturalnego.
- 2) W spisie literatury doktorant powołuje się na Ramową Instrukcję Eksploatacji Transformatorów (RIET) datowaną na rok 2012. Obecnie obowiązuje nowa wersja RIET wydana w roku 2022. Ponieważ praca powstała w roku 2023 powinna uwzględniać aktualny dokument.
- 3) Brakuje mi w pracy krótkiej wzmianki o zastosowaniu praktycznym papieru typu Nomex. Czy autor mógłby przytoczyć przykłady jednostek transformatorowych z izolacją aramidową z użyciem papieru Nomex 910 lub Nomex 926 (napięcia i moce), jako potwierdzenie stosowania obu tych materiałów w przemyśle transformatorowym?
- 4) Brakuje mi również w pracy nieco szerszego opisu motywacji do przeprowadzenia założonego programu badań. Czy doktorant mógłby tę motywację przedstawić szerzej podczas prezentacji omawianej w czasie obrony?

- 5) Z opisu obiektów poddanych badaniom trudno jednoznacznie wywnioskować, co stanowiło bazę porównawczą przy przygotowywaniu próbek w kontekście zastosowania danego typu papieru, jego objętość czy grubość? Nie jest to jasne dla recenzenta na podstawie lektury pracy.
- 6) Jak była rzeczywista liczba patronów użytych w badaniach – pytanie wynika z zestawienia zawartego w tab. 4.6? Z opisu trudno wywnioskować czy przygotowania materiału badawczego odbywało się indywidualnie dla danego zestawu papier-ciecz i powielane odpowiednią liczbę razy czy od razu przygotowano pełną bazę próbek dla wszystkich konfiguracji papier-ciecz?
- 7) Jak przechowywano patроны gotowe do pomiarów o danej zawartości wilgoci po ich przygotowaniu? Ile czasu zabierał „pojedynczy” pomiar wykonany dla danej konfiguracji materiałów.
- 8) Prezentując wyniki w rozdz. 4.4 autor podaje, że wynikiom pomiarów odpowiada krzywa logarytmiczna, ale nie podaje konkretnych wzorów. Odpowiednie wzory pojawiają się w podrozdziale 4.5.3. Rozumiem, że są to wzory odpowiadające krzywym z rys. 4.15–4.20? Czy doktorant może podać interpretację wyrazu wolnego w przytoczonych wzorach? Czy w ogóle istnieje jakaś fizyczna ich interpretacja?
- 9) Czy fotografie z rys. 4.12 do 4.14 dotyczą momentu inicjacji zjawiska czy raczej jego dalszej fazy?
- 10) Chciałbym poprosić autora rozprawy o próbę wskazania zagadnień badawczych, które mogłyby stanowić kontynuację prac zaprezentowanych w rozprawie. We wnioskach doktorant formułuje tylko jedną myśl w tym zakresie.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam jak najbardziej pozytywnie, o czym świadczy m.in. brak znaczących uwag natury merytorycznej do jej zawartości. Za najważniejsze osiągnięcia doktoranta w ramach przedłożonej do oceny pracy doktorskiej uznaję:

- oryginalną tematykę rozprawy, która obejmuje zagadnienie ważne zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia;
- uwzględnienie w pracy najnowszych trendów w zakresie materiałów izolacyjnych stałych stosowanych w transformatorach z przeznaczeniem do pracy w wysokich temperaturach;
- samodzielne przygotowanie materiału badawczego w postaci modeli / obiektów do analizy w różnych konfiguracjach papier/ciecz i wnikliwe określenie metodologii i problemów badawczych do rozwiązania;
- spójny i metodologicznie poprawny sposób realizacji badań eksperymentalnych;



- oryginalne podejście do analizy otrzymanych wyników szczególnie w zakresie porównania materiałów izolacyjnych przy założeniu identycznego procesu kondycjonowania próbek przed badaniem zasadniczym;
- jednoznaczne powiązanie wyników badań eksperymentalnych z zagadnieniami praktycznymi eksploatacji transformatorów z izolacją wysokotemperaturową.

Zamieszczone uwagi i pytania do dyskusji w żadnym stopniu nie umniejszają osiągnięcia oraz wartości ocenianej rozprawy.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Lewandowskiego pt.: „*Zjawisko bąbelkowania w nowoczesnych układach izolacyjnych transformatorów energetycznych*” spełnia wymagania stosownej ustawy i może być **dopuszczona do publicznej obrony.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pawel Kozłowski', is written in a cursive style.