

Prof. dr hab. inż. Tomasz N. Kołtunowicz
Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska

Recenzja rozprawy doktorskiej pod tytułem:
„Diagnostyka własności dielektrycznych izolacji celulozowo-aramidowej stosowanej
w olejowych transformatorach mocy z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych”
autorstwa Pana mgra inż. Adama Krotowskiego,
promotor dr hab. inż. Stefan Wolny, prof. ucz.

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawę opracowania recenzji w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne stanowi pismo nr RR/343/2025 Rektora Politechniki Opolskiej z dnia 25 marca 2025 r.

2. Ocena rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa przygotowana została w formacie A4. Jej objętość wynosi 160 stron. Praca składa się z 13 ponumerowanych rozdziałów poprzedzonych *streszczeniami w języku polskim i angielskim* oraz *wykazem stosowanych symboli*. Rozdziały zatytułowane są następująco: 1. *Wstęp*, 2. *Cel i założenia pracy*, 3. *Ogólna charakterystyka izolacji celulozowo-olejowej*, 4. *Charakterystyka izolacji celulozowo-aramidowo-olejowej*, 5. *Degradacja stanu izolacji transformatorów mocy*, 6. *Metody diagnostyczne oceny izolacji papierowo-olejowej*, 7. *Badania laboratoryjne izolacji celulozowo-aramidowo-olejowej metodą PDC*, 8. *Wyniki pomiarów metodą PDC*, 9. *Analiza energii aktywacji i dominujących stałych czasowych*, 10. *Powtarzalność i odtwarzalność wyników*, 11. *Wnioski końcowe*, 12. *Zagadnienia otwarte*, 13. *Literatura*. Na końcu rozprawy umieszczono *spis rysunków* oraz *spis tabel*.

2.2. Tematyka rozprawy

Za cel Doktorant postawił sobie sprawdzenie możliwości adaptacji wykorzystania diagnostycznej metody PDC (*Polarization and Depolarization Current*) do szacowania stopnia zesterzenia i zawilgocenia półsyntetycznej, hybrydowej izolacji celulozowo-

aramidowej stosowanej w transformatorach energetycznych dużej mocy napelnianych estrami syntetycznymi lub naturalnymi.

Uważam, że cel pracy jest ambitny i w wystarczającym stopniu spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Doktorant stawia trzy hipotezy badawcze, a mianowicie:

- 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,
- 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,
- 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.

Postawione hipotezy badawcze sformułowane są w odpowiedni sposób i stanowią podstawę do planowania i prowadzenia eksperymentów w ramach realizacji rozprawy doktorskiej.

Stwierdzam, iż tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy zagadnień aktualnych i istotnych tak dla elektrotechniki jak i dyscyplin pokrewnych i jest naturalną kontynuacją badań prowadzonych od lat w Katedrze Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.

2.3. Charakterystyka poszczególnych rozdziałów rozprawy

Rozdział pierwszy zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki, którą zajmował się Doktorant podczas realizowania swojej pracy doktorskiej.

W rozdziale drugim Autor przedstawia cel, zakres badań i postawione założenia pracy.

Informacje o układzie izolacyjnym celulozowo-olejowym w postaci papieru elektroizolacyjnego typu kraft oraz oleju mineralnego stosowanym do budowy układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych Doktorant zamieścił w **rozdziale trzecim**.

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawił ogólną charakterystykę aramidu oraz szczegółową charakterystykę papieru NOMEX®910 wraz z przykładowym zastosowaniem tego materiału do budowy izolacji stałej transformatorów mocy oraz opisał estry jako ciecze

dielektryczne stosowane w układach izolacyjnych. Autor dokonał szczegółowej charakterystyki oraz porównania estru syntetycznego MIDEL® 7131 i bio-oleju Nytro® BIO 300X w odniesieniu do oleju mineralnego.

Rozdział piąty zatytułowany „*Degradacja stanu izolacji transformatorów mocy*” zawiera charakterystykę czynników powodujących degradację układu izolacyjnego na skutek wieloletniej eksploatacji transformatorów mocy. Doktorant przedstawił parametry fizykochemiczne umożliwiające diagnostykę stanu układu izolacyjnego oraz metody mające na celu przedłużenie żywotności izolacji transformatorowej.

W **rozdziale szóstym** dokonano klasyfikacji metod pomiarowych powszechnie wykorzystywanych do diagnostyki celulozowo-olejowych układów izolacyjnych. Dokonano także opisu zjawisk polaryzacyjnych i przewodnictwa prądowego dielektryków. Szczegółowo scharakteryzowano polaryzacyjne metody badawcze wykorzystywane do diagnostyki papierowo-olejowych układów izolacyjnych.

Rozdział siódmy jest pierwszym z rozdziałów autorskich, który przedstawia stanowisko laboratoryjne służące do przygotowania próbek pomiarowych uwzględniający proces przyspieszonego starzenia termicznego, proces kontrolowanego zwilżania próbek w warunkach komory klimatycznej, proces impregnacji izolacji cieczami dielektrycznymi oraz realizację badań eksperymentalnych metodą PDC na zaprojektowanym i wykonanym stanowisku pomiarowym.

W **rozdziale ósmym** Doktorant przedstawia autorskie wyniki z przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych uzyskanych metodą PDC. Opisał czynniki mające wpływ na wartości zarejestrowanych przebiegów prądu polaryzacji I_P i depolaryzacji I_D uzyskanych metodą PDC a mianowicie: temperatura pomiaru, stopień zestarzenia termicznego, stopień zawilgocenia izolacji, stopień zmieszania oleju mineralnego z estrem syntetycznym, rodzaj zastosowanej cieczy dielektrycznej do impregnacji izolacji NOMEX®910.

Rozdział dziewiąty zawiera opis wyznaczenia energii aktywacji E_A oraz stałych czasowych τ_1 (dominująca stała czasowa procesów relaksacji włókien aramidowych) i τ_2 (dominująca stała czasowa procesów relaksacji włókien celulozowych), z których zbudowana jest struktura izolacji celulozowo-aramidowej NOMEX®910 oraz szczegółową analizę wpływu tych czynników na zachowanie się parametrów charakterystycznych dla procesu polaryzacji izolacji NOMEX®910.

W **rozdziale dziesiątym** umieszczono wyniki przeprowadzonych analiz mających na celu udowodnienie powtarzalności i odtwarzalności wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Doktorant wykonał modele statystyczne w postaci parametrycznych i nieparametrycznych testów istotności. Analizie statystycznej poddano pomiary prądów depolaryzacji I_D wykonane na próbkach izolacji NOMEX®910 o śladowej zawartości

wilgoci, zestarzonych w temperaturze 190°C przez 25 h – odczytane dla 25 sekundy pomiaru. Analiza powtarzalności wyników zrealizowana została za pośrednictwem przeprowadzenia 50 pomiarów prądu depolaryzacji I_D na tej samej próbce pomiarowej natomiast analizę odtwarzalności przeprowadzono za pośrednictwem pomiarów prądów depolaryzacji I_D na 5 różnych próbkach izolacji wykonując po 10 pomiarów dla każdej z próbek.

Rozdział jedenasty zawiera podsumowanie rezultatów zrealizowanych badań i wnioski z przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz analizę uzyskanych wyników. Autor wskazuje również praktyczne możliwości wykorzystania technik i metod przedstawionych w dysertacji.

W **rozdziale dwunastym** Doktorant przedstawia kierunki przyszłych badań nad celulozowo-aramidową izolacją NOMEX®910 impregnowaną cieczami dielektrycznymi (olejami mineralnymi oraz estrami syntetycznymi i naturalnymi). Wskazano na ograniczenia i dalsze kierunki badań.

Literatura pracy zawiera 130 pozycji literatury światowej i krajowej tematycznie związanych z rozprawą.

Spis rysunków zawiera chronologiczne zestawienie wszystkich rysunków znajdujących się w rozprawie.

Spis tabel zawiera chronologiczne zestawienie wszystkich tabel znajdujących się w rozprawie.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Rozprawa ma charakter eksperymentalny wykorzystujący diagnostyczną metodę PDC (*Polarization and Depolarization Current*) do szacowania stopnia zesterzenia i zawilgocenia hybrydowej izolacji celulozowo-aramidowej stosowanej w transformatorach energetycznych dużej mocy napełnianych estrami syntetycznymi lub naturalnymi. Tematyka odpowiada na aktualne potrzeby energetyki zawodowej.

Do głównych osiągnięć Autora można zaliczyć:

- dokonanie obszernego przeglądu literatury w zakresie tematyki związanej z realizowaną pracą,
- zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego,
- określenie metodyki pomiarowej,
- przeprowadzenie badań laboratoryjnych metodą PDC,
- określenie energii aktywacji E_A oraz stałych czasowych τ_1 (dominująca stała czasowa procesów relaksacji włókien aramidowych) i τ_2 (dominująca stała czasowa procesów relaksacji włókien celulozowych) dla badanej izolacji celulozowo-aramidowej,

- przeprowadzenie analiz powtarzalności i odtwarzalności wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych,
- wskazanie praktycznych możliwości wykorzystania zaproponowanych w rozprawie technik i metod badawczych.

W mojej opinii, Doktorant w stopniu znacznym opanował tematykę dotyczącą rozprawy, zarówno w zakresie teoretycznym jak i eksperymentalno-praktycznym. Potwierdzeniem tego jest dobra znajomość problemów technologicznych i naukowych związanych transformatorami mocy a w szczególności z ich izolacją – izolacja ciekło-stała – celulozowo-aramidowa impregnowana estrami syntetycznymi i naturalnymi.

4. Ocena sposobu edycji pracy i uwagi formalne

Rozprawa przygotowana została w sposób poprawny. Podział treści jest logiczny i uporządkowany. Szata graficzna jest staranna. Praca została zredagowana poprawnie. Sposób przedstawienia treści jest zadowalający. Wszystkie pozycje bibliograficzne zamieszczone w spisie literatury mają swoje odniesienie w treści rozprawy. Praca została napisana poprawnie pod względem językowym, ale Autor nie ustrzegł się błędów gramatycznych i usterek edycyjnych, interpunkcyjnych oraz stylistycznych. Do ważniejszych błędów można zaliczyć:

1. Podpisy pod rysunkami powinny zawierać wszystkie informacje dotyczące danego rysunku i powinny tworzyć integralną część podpisu.
2. Na rysunkach, które są zaczerpnięte z zagranicznej literatury należałoby przedstawić opisy w języku polskim – np. rysunek 7.13 (str. 85).
3. Słaba jest jakość graficzna tabel zamieszczonych w pracy (np. tabele 3.1, 3.2, 4.1, 4.2 itp.) – należałoby zamieścić tabele w lepszej rozdzielczości.
4. W pracy sporadycznie można zaobserwować występowanie tzw. „sierot” (np. i, o, w, z, itp.) oraz „wdów” (np.: do, na, od) na końcach wierszy. Należy się wystrzegać tego typu błędów edytorskich.
5. W spisie literatury zamieszczono dwa razy tą samą pozycję literaturową, a mianowicie pozycje [62] oraz [85].

5. Uwagi merytoryczne

1. W jaki sposób kontrolowanie i potwierdzenie zawilgocenia próbki aramidu na poziomie 0 % wag. jest możliwe w warunkach laboratoryjnych – czy taka wartość jest realna do osiągnięcia, czy jedynie przybliżona?
2. Czy w warunkach podwyższonej wilgotności (90 % RH, 30°C) istniało ryzyko zakłócenia działania wagi elektronicznej (np. przez kondensację wilgoci lub wpływ na czujnik tensometryczny)? Jak zweryfikowano poprawność pomiarów masy próbki w takich warunkach?

3. Czy podczas nawijania preszpanu na wałek istnieje pewność, że w szczelinach między warstwami nie pozostaje uwięzione powietrze? Jakie środki zostały podjęte, aby zapewnić pełny kontakt warstw i eliminację mikroszczelin powietrznych?
4. Czy wałek z nawiniętym papierem aramidowym został całkowicie zanurzony w oleju podczas przeprowadzenia badań? Czy papier aramidowy był wyciągany z naczynia, w którym prowadzono jego impregnację, przed wykonaniem pomiarów? Jeśli tak, to czy ten etap mógł wpłynąć na wyniki – np. ponowny kontakt z powietrzem atmosferycznym?
5. Dlaczego zestarzała próbka charakteryzuje się mniejszym prądem polaryzacji – czy to oznacza większą wytrzymałość dielektryczną, czy raczej degradację struktur odpowiedzialnych za polaryzację?
6. Na rysunku 8.9 pokazano zależność prądu polaryzacji od czasu dla próbek o różnych poziomach zawilgocenia. Zastanawiające jest, że próbki nie układają się zgodnie z rosnącą zawartością wilgoci — np. próbka o 1 % wilgoci wykazuje większy prąd polaryzacji (a więc wyższą konduktywność) niż próbka 2 % w czasie około 6000 s. Jak można wyjaśnić tę nieliniowość? Czy może to wynikać z niejednorodności rozkładu wilgoci, różnic w strukturze próbki lub błędów eksperymentalnego?
7. Analizując rysunek 8.13, który przedstawia prądy polaryzacji w funkcji czasu dla różnych mieszanin cieczy izolacyjnych, zauważamy interesujące zjawisko. Próbka zawierająca 75 % oleju mineralnego i 25 % estru wykazuje wyższy prąd polaryzacji w porównaniu do mieszaniny o proporcji 50 % oleju mineralnego i 50 % estru. Jakie mechanizmy fizyczne lub chemiczne odpowiadają za to, że zwiększenie udziału oleju mineralnego w mieszaninie, od 50 % do 75 %, prowadzi do podwyższenia prądu polaryzacji w tych cieczach izolacyjnych?
8. Patrząc na rysunek 9.4, który przedstawia zależność energii aktywacji E_A od temperatury starzenia termicznego dla różnych próbek izolacji, widać, że zastosowano liniową aproksymację (regresję liniową). Współczynniki determinacji R^2 dla obu próbek wynoszą odpowiednio 0,7673 dla MIDEL® 7131 oraz 0,9178 dla Nytro® BIO 300X. Zastanawiam się, czy w przypadku tych danych, zwłaszcza dla MIDEL® 7131, gdzie R^2 wynosi około 0,77, aproksymacja liniowa jest optymalnym wyborem, czy też dopasowanie innego typu funkcji (np. nieliniowej, wielomianowej wyższego stopnia) mogłoby zapewnić lepsze odwzorowanie zależności i dokładniejsze prognozy? Jakie są kryteria i uzasadnienia dla wyboru modelu liniowego w tym konkretnym przypadku, biorąc pod uwagę widoczne rozrzuty punktów?
9. Jak widzi Doktorant perspektywy praktycznego zastosowania wyników uzyskanych przy realizacji rozprawy doktorskiej? Jakie dalsze kierunki badań zapoczątkowanych w przedstawionej rozprawie są zdaniem jej Autora najbardziej obiecujące?

6. Wnioski końcowe

Moje uwagi nie obniżają pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy. Praca ma wyraźny aspekt aplikacyjny. Moim zdaniem jest to duże osiągnięcie Doktoranta. Pan mgr inż. Adam Krotowski jest współautorem czterech artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie oraz doniesienia konferencyjnego opublikowanego w materiałach konferencyjnych – prace te znajdują się w bazie Scopus. Wszystkie te prace dotyczą recenzowanej rozprawy a cztery z nich zostały w niej zacytowane.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr inż. Adama Krotowskiego pod tytułem: *„Diagnostyka własności dielektrycznych izolacji celulozowo-aramidowej stosowanej w olejowych transformatorach mocy z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych”* spełnia wymagania stawiane przez Ustawę w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne i wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Tomasz N. Kołtunowicz
Politechnika Lubelska