

Prof. dr hab. inż. **Konstanty Marek Gawrylczyk**, Szczecin, dnia 6 czerwca 2023 r.
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki
PL-70-313 Szczecin, ul. Sikorskiego 37
e-mail: Konstanty.Gawrylczyk@zut.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. **Kamila Lewandowskiego**

p.t. "**Zjawisko bąbelkowania w nowoczesnych układach izolacyjnych transformatorów energetycznych**"

Recenzję przygotowano zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej z dnia 18.04.2023r.
Promotorem opiniowanej rozprawy jest dr hab. inż. Hubert Morańda, prof. Uczelni.

1. Ocena wyboru tematyki naukowej

Tematyka naukowa prezentowana przez Doktoranta to w najogólniejszym ujęciu diagnostyka transformatorów energetycznych. Najczęstszym rodzajem uszkodzenia są defekty układu izolacyjnego. Wynikają one z długotrwałości użytkowania danej jednostki, ale również ze sposobu jej użytkowania. W każdym wypadku z wiekiem transformatora wzrasta zawilgocenie jego izolacji prowadząc do powstawania wyładowań niezupełnych, a następnie do awarii katastrofalnej. Taka awaria prowadzi do strat wynikających nie tylko ze zniszczenia jednostki, ale często również obiektów znajdujących się w pobliżu. Konieczność zapobiegania takim zdarzeniom doprowadziła do rozwoju wielu metod diagnostycznych. Najłatwiejsza do przeprowadzenia na stanowisku zainstalowania diagnostyka polega na wykonaniu prób olejowych. Zawilgocenie oleju jest ściśle powiązane z zawilgoceniem izolacji stałej poprzez krzywe Oomena. Warunkiem jest jednak, że transformator znajduje się w stanie równowagi termicznej, o co jest niezwykle trudno. Wynika stąd, że diagnostyka oparta na oleju może prowadzić do wyników obarczonych błędem. Niedoszacowanie zawilgocenia izolacji stałej może po przekroczeniu temperatury krytycznej uzwojeń prowadzić do wystąpienia efektu bąbelkowania (*bubble effect*). Efekt ten może przebiegać w sposób gwałtowny prowadząc do awarii transformatora. Badania nad występowaniem efektu bąbelkowania stały się przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej. Jest to tematyka niezwykle istotna w praktyce diagnostyki i użytkowania transformatorów. Z przedstawionych powyżej przyczyn uważam wybór tematyki naukowej rozprawy za trafny i uzasadniony.

2. Ocena treści rozprawy

We wstępnym rozdziale drugim pracy omówiono zagadnienia związane z diagnostyką izolacji uzwojeń transformatorów. Po uwagach dotyczących konstrukcji transformatorów Autor przechodzi do płynów izolacyjnych, najpierw omawiając parametry i wymagania dotyczące oleju mineralnego, dotąd stosowanego najczęściej. Tutaj Autor podaje przyczyny degradacji i zawilgocenia oleju. Następnie Doktorant przechodzi do estrów syntetycznych, których głównym przedstawicielem jest Midel. Estrы syntetyczne wpisują się znakomicie w politykę środowiskową, ponieważ są niemal całkowicie biodegradowalne. Poza tym zastosowanie Midelu zwiększa bezpieczeństwo pożarowe, daje większą chłonność wody, możliwość mieszania z olejem mineralnym, jak też porównywalne z nim parametry elektryczne. Z kolei duża chłonność wody umożliwia suszenie izolacji stałej drogą wymiany oleju mineralnego na syntetyczny. Autor przedstawia wykresy literaturowe granicznego nasycenia wodą dla oleju mineralnego, dla oleju silikonowego, estru naturalnego oraz estru syntetycznego.

Kolejna część rozdziału drugiego została poświęcona izolacji stałej transformatorów, najpierw tej na bazie celulozy. Rodzaje izolacji zostały uszeregowane na podstawie ich odporności temperaturowej. Autor podaje wybrane parametry celulozy: elektryczne, chemiczne, fizyczne oraz mechaniczne. W kolejnym podrozdziale Autor przechodzi do materiałów izolacyjnych na bazie aramidu. Konstruktorzy dążą do podwyższenia temperatury roboczej uzwojeń, a przynajmniej do stworzenia możliwości krótkotrwałego przeciążania jednostki. W tym celu konieczne jest zastosowanie wysokotemperaturowych materiałów izolacyjnych o bardzo wysokiej cenie w porównaniu do izolacji celulozowej. Z tych względów zyskały na popularności materiały bazujące na aramidzie. Powstała seria produktów Nomex, w wersji z czystym aramidem lub zmieszany z celulozą. Tego rodzaju izolacja uzwojeń jest stosowana wyłącznie w połączeniu z izolacją ciekłą. W zależności od typu Nomexu, różni się on znacznie wartością przenikalności elektrycznej, przy czym większa wartość tej przenikalności wiąże się z mniejszą wartością natężenia pola elektrycznego w danej warstwie izolacji.

Następnie Autor zajmuje się starzeniem izolacji stałej transformatorów. Dla izolacji celulozowej proces ten został dobrze zbadany i opisany. Wiąże on się ze stopniem polimeryzacji łańcuchów celulozy. Dla nowego materiału współczynnik polimeryzacji DP wynosi nawet 1600, a pod koniec życia izolacji spada do 200. Z tym się wiąże utrata właściwości mechanicznych izolacji, ale również wytwarzanie wody, co jest przedmiotem tej

dysertacji. Na stwierdzenie stopnia zesterzenia izolacji pozwala analiza gazów rozpuszczonych w oleju oraz analiza zawartości furanów w oleju mineralnym. Doktorant podaje tabelę zawartości furanów odniesioną do stopnia zesterzenia izolacji. Starzenie izolacji można spowolnić zmniejszając zawartość tlenu w oleju.

W kolejnym podrozdziale Doktorant opisuje związek przenikalności elektrycznej izolacji stałej i ciekłej pod kątem adsorpcji i desorpcji wody. Przenikalność tą można przedstawić w postaci zespolonej, w której część rzeczywista jest proporcjonalna do energii pola elektrycznego, natomiast urojona wiąże się ze stratami w materiale izolacyjnym. Czysty Nomex ma wyraźnie większą wartość części rzeczywistej przenikalności, co już stwierdzono wcześniej. Przenikalność elektryczną można powiązać z polarnością materiału, która z kolei pozwala na adsorpcję wody, której obecność w izolacji wpływa na zjawisko bąbelkowania będące przedmiotem rozprawy.

Rozdział 2.2 porusza problemy związane z zawilgoceniem układów izolacyjnych oraz sposoby zapobiegania mu. Autor przytacza diagram prezentujący zależność zawilgocenia izolacji w funkcji wieku transformatora zainstalowanego w różnych krajach europejskich. Okazuje się, że nawet względnie nowe transformatory mogą posiadać nadmiernie zawilgoconą izolację, jednak tendencja do wzrostu zawilgocenia z wiekiem transformatora jest widoczna. Wynika to stąd, że najpoważniejszym źródłem wody jest proces rozpadu celulozy, jednak często przeprowadzane inspekcje połączone z otwieraniem kadzi też mogą pogorszyć sytuację. Ponieważ w procesie produkcji celuloza chłonie wilgoć z powietrza, po zmontowaniu część aktywna poddawana jest suszeniu, sprowadzając w ten sposób zawilgocenie izolacji stałej poniżej 1%. Suszenie odbywa się pod próżnią, więc jest procesem kłopotliwym. Przed wytworzeniem próżni następuje nagrzewanie części aktywnej transformatora. Po wytworzeniu próżni można dodatkowo natrysnąć uzwojenie gorącą naftą, co w sumie pozwala zmniejszyć zawilgocenie nawet do 0,2%.

W trakcie użytkowania transformatora najpoważniejszym skutkiem obecności wilgoci w izolacji są wyładowania niezupełne oraz zjawisko bąbelkowania. Wyładowania niezupełne przyspieszają procesy destrukcji izolacji poprzez zjawisko drzewienia celulozy i powstawania w niej kanałów przewodzących. W kolejnym podrozdziale Doktorant opisuje metody wyznaczania zawilgocenia izolacji stałej. Wymienia tu: FDS (spektroskopia dielektryczna), RVM (pomiar napięcia powrotnego), PDC (prądy polaryzacji i depolaryzacji) oraz omawia krzywe równowagi układu celuloza-olej. Autor pokrótce komentuje zalety i wady poszczególnych metod. Na końcu można znaleźć trochę optymistyczną uwagę, że opisane

metody dają zbliżony wynik. Dalej Autor omawia bezpośrednie metody wyznaczania zawilgocenia, które są przydatne jednak wyłącznie na etapie produkcji transformatora.

W kolejnym rozdziale 2.3 Doktorant przechodzi do zasadniczego problemu rozprawy, jakim jest zjawisko bąbelkowania. Na skutek wystąpienia tego zjawiska może nastąpić gwałtowne pogorszenie własności układu izolacyjnego oraz wzrost ciśnienia wewnątrz kadzi. Konsekwencją może być awaria jednostki, a co najmniej wystąpienie wyładowań niezupełnych powodujących destrukcję izolacji. Warunkiem wystąpienia bąbelkowania jest przekroczenie temperatury inicjacji tego zjawiska, nawet gdy wzrost temperatury ma charakter miejscowy (tzw. hot-spot). Próbuje się temu zapobiegać kontrolując temperaturę, co jednak jest możliwe wyłącznie w odniesieniu do oleju. W warunkach przeciążeń temperatura oleju rośnie dopiero po 15 minutach po wzroście temperatury uzwojeń. W przypadku kosztownych jednostek pomiar temperatury uzwojeń mogą zapewniać systemy pomiarowe sprzężone światłowodami. Temperatura inicjacji bąbelkowania zależy w znacznej mierze od zawilgocenia materiału izolacyjnego, co jest kolejną przesłanką do utrzymywania tegoż na niskim poziomie. Poza tym pewien wpływ mają takie parametry, jak: obecność gazów rozpuszczonych w oleju, stopień polimeryzacji celulozy oraz zesterzenie oleju. Połączenie kilku z tych przyczyn może prowadzić do znacznego obniżenia temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania.

Tworząc matematyczny model zjawiska bąbelkowania można się oprzeć na założeniu, że przy zawilgoceniu celulozy nie przekraczającym 4,5% woda w izolacji występuje tylko w wyniku adsorpcji fizycznej. Łańcuchy celulozy łączą się w długie struktury zwane fibrylami, tworząc w ten sposób kapilary pozwalające na transport wody na znaczną odległość. Skutkiem pojawienia się pary wodnej w takich kapilarach może być wypchnięcie oleju, czyli deimpregnacja izolacji międzyuzwojeniowej. Podane założenia zostały wykorzystane przez kilku autorów do wyprowadzenia wzorów na temperaturę inicjacji bąbelkowania.

W rozdziale trzecim następuje definicja celu, tezy i zakresu pracy, traktując wcześniejsze rozdziały jako wprowadzenie do tematyki. Teza pracy wraz z podtezą brzmią:

Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w złożonych układach izolacyjnych zależy w istotny sposób od polarności komponentów tworzących układ izolacyjny oraz

Zastąpienie celulozy aramidem, który jest materiałem o mniejszej polarności, powinno powodować obniżenie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania (1).

Dalej przychodzą jeszcze dwie podtezy:

W układzie izolacyjnym aramid - dielektryk ciekły zastąpienie oleju mineralnego estrem syntetycznym powinno powodować wzrost temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania (2)

oraz

Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiałach stanowiących kompozycję włókien aramidowych i celulozowych powinna być wyższa niż w materiałach zawierających tylko włókna celulozowe albo aramidowe (3).

Przesłanki fizyczne tych zjawisk mówią, że wszystkie cztery tezy powinny dać się udowodnić eksperymentalnie. Aramid jest mniej polarny niż celuloza, czyli ze względu na mniejszą energię wiązań fizycznych powinna występować łatwiejsza desorpcja wody z tego materiału. Z kolei, ponieważ energia wiązań aramidu z estrem jest większa niż z olejem mineralnym, uwolnienie wody będzie trudniejsze. Ostatnia podteza nie jest całkiem oczywista, jednak przedstawione przez Autora uzasadnienie o lokalnym obniżeniu temperatury spowodowanym uwolnieniem wody z włókien aramidowych jest przekonujące.

W rozdziale czwartym opisano badania eksperymentalne Doktoranta. Obiektami były: papier celulozowy, papier będący połączeniem celulozy i aramidu oraz papier czysto aramidowy. Papier nawinięto na aluminiowe tuleje z dodatkowym otworem do pomiaru temperatury za pomocą termopary. Ze względu na dobrą przewodność cieplną użytego materiału i powolne tempo prowadzenia eksperymentu można założyć, że temperatura papieru, czyli temperatura inicjacji bąbelkowania jest równa temperaturze tulei aluminiowej, zwanej przez Doktoranta patronem. Szerokość próbek papierowych była dla wszystkich próbek taka sama, natomiast długość była dobierana w zależności od grubości papieru w taki sposób, aby objętość materiału była taka sama. Taką koncepcję przygotowania próbek uważam za słuszną. Stopień zawilgocenia papieru wyznaczano metodą ważenia wagą o wysokiej dokładności. Początkowo próbki suszono w atmosferze bliskiej próżni, potem określano masę papieru suchego. Zaproponowana metoda jest metodą różnicową i może prowadzić do znacznych błędów. Następnie wszystkie próbki zawilgocono w komorze klimatycznej równocześnie kontrolując masy próbek. Krzywe równowagi wilgotności dla papieru celulozowego mówią, że uzyskanie tą metodą niskiego zawilgocenia, poniżej 1,4%, nie jest możliwe. Dlatego niskie zawilgocenie uzyskano bez pomocy komory klimatycznej, po prostu odczekując w warunkach laboratoryjnych, aż próbka osiągnie odpowiednie zawilgocenie, co kontrolowano poprzez przyrost masy. Jednocześnie wykazano, że próbki zawierające aramid adsorbowały mniej wody, niż celulozowe, co Autor tłumaczy ich mniejszą polarnością. Po uzyskaniu pożądanego zawilgocenia próbki umieszczano w oleju

celem impregnacji. Wprawdzie naczynie było szczelnie zamknięte, ale pewna niewielka część wilgoci musiała przejść do oleju (lub odwrotnie) osiągając równowagę układu olej-papier. Dla temperatury 20°C olej mineralny o zawartości wody 13ppm jest w równowadze z nowym papierem celulozowym o zawilgoceniu około 4,5%. Świadczy to o wysokiej trudności przeprowadzenia wiarygodnego eksperymentu.

Następnie opisano stanowisko do badania temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania. Naczynie pomiarowe napełniano przed każdym pomiarem świeżym olejem o temperaturze 20°C. Temperaturę patronu zwiększano w tempie 1°C/s następnie zmniejszając to tempo do 0,1°C/s. Czas pomiaru wynosił zatem kilkadziesiąt minut, co dawało możliwość migracji wilgoci pomiędzy papierem, a olejem. Przy temperaturze 80°C równowaga układu papier celulozowy – olej mineralny zachodzi dla 13ppm przy zawilgoceniu papieru ok. 2%.

Celem wykazania związku polarności materiału z temperaturą inicjacji zjawiska bąbelkowania wyznaczono przenikalności elektryczne badanych materiałów. Za pomocą miernika RLC zmierzono pojemność odpowiednio przygotowanych próbek. Wyniki otrzymane dla 50Hz zamieszczono w tabeli. Uzyskano w ten sposób relację pomiędzy zawilgoceniem materiału, a jego polarnością.

W dalszej części rozdziału pokazano zdjęcia obrazujące zjawisko bąbelkowania oraz wykresy temperatury inicjacji zjawiska w zależności od zawilgocenia dla różnych kombinacji materiałów. Dla suchych papierów ta temperatura wynosi aż 180°C, podczas gdy przy silnym zawilgoceniu (powyżej 4%) spada do około 120°C. Przy transformatorach posiadających izolację mieszaną, gdzie część jest z papieru celulozowego, a część aramidowego, zawilgacanie odbywa się w różny sposób, co znajduje również odzwierciedlenie w różnicy temperatury inicjacji w nich zjawiska bąbelkowania. W przeprowadzonych badaniach potwierdzenie znalazła podteza (1) dysertacji. W trakcie badań zauważono, że materiał będący kompozytem aramid i celulozy charakteryzuje się nieznacznie wyższą temperaturą inicjacji bąbelkowania, co potwierdziło postawioną podtezę (3). W trakcie badań oceniono również intensywność bąbelkowania, która była najmniejsza w papierze aramidowym, natomiast w celulozowym i mieszanym była podobna. Wyniki te dotyczą obydwu rodzajów stosowanych olejów. W zależności od zastosowanego oleju, temperatura inicjacji jest dla estru nieznacznie wyższa, zarówno dla celulozy, jak i aramidów, co potwierdza podtezę (2). Te trzy podtezy składają się na potwierdzenie tezy głównej rozprawy. Na zakończenie pokazano równania aproksymujące zjawiska inicjacji zjawiska bąbelkowania dla różnych kombinacji materiałów izolacyjnych. Krzywe uzyskane przez innych autorów mają bardzo zbliżoną postać.

3. Uwagi ogólne

Mocną stroną pracy jest dokładny przegląd literaturowy zagadnienia. Dowodzi on bardzo dobrej orientacji autora w stopniu zaawansowania rozwiązań stosowanych w technice.

Mocną stroną jest wykonany eksperyment naukowy z wykorzystaniem własnego stanowiska badawczego. Doprowadził on do powstania wartościowych wniosków oraz zależności przydatnych w projektowaniu i eksploatacji transformatorów.

Wymienionych przeze mnie wcześniej zastrzeżeń odnośnie metodyki pomiarowej nie należy traktować jako słabych stron pracy, ponieważ nie widzę innego sposobu przeprowadzenia rzeczonych badań.

4. Uwagi szczegółowe

Praca jest napisana niezwykle przejrzysto i komunikatywnie. Ilustracje i wykresy są czytelne i dobrej jakości. W pracy zauważyłem jedynie drobne nieścisłości w odniesieniach do rysunków: na str. 66 powinno być 2.11, podobnie na str. 68, na str.97 chodzi o podtezę (2).

5. Ocena ogólna i wnioski końcowe

Uważam przedstawioną rozprawę za bardzo wartościowy wkład do badań nad układami izolacyjnymi stosowanymi w transformatorach energetycznych. Rozprawa stanowi oryginalny wkład autora w rozwiązanie ważnego zagadnienia naukowego.

Poziom edytorski pracy i poprawność językowa nie budzi zastrzeżeń.

Stwierdzam, że cel rozprawy został osiągnięty, a autor wykazał się wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z dyscypliny inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki. Rozprawa doktorska mgr. inż. Kamila Lewandowskiego spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Ze względu na ważność rozwiązywanego zagadnienia i znaczący wkład autora wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

/K.M.Gawrylczyk/