

Szczecin, 27 sierpnia 2020 r.

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

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

mgr. inż. **Konrada Kierczyńskiego**

pod tytułem: **“Opracowanie sposobu wyznaczania zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej transformatorów na podstawie pomiarów rezystancji stałoprądowej”**

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

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Lubelskiej, dr. hab. inż. Wojciecha Jarzyny, prof. PL oraz uchwała Rady Dyscypliny Naukowej AEiE Politechniki Lubelskiej nr AEiE/9.2/2020 z dnia 7 lipca 2020 r.

### **1. Tematyka rozprawy**

Recenzowana praca doktorska składa się z ośmiu rozdziałów, które można podzielić na część literaturową (rozdziały 2 i 3) oraz badawczą (rozdziały 4-8). Dodatkowo zawarto w niej streszczenie, abstract w języku angielskim, wykaz stosowanych oznaczeń i skrótów, wstęp (oznaczony jako rozdział 1) oraz spis literatury, który liczy 149 pozycji. Objętość pracy wynosi 128 stron.

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z procesami starzeniowymi izolacji stało-ciekłej transformatorów energetycznych, a w szczególności problemu określania poziomu zawilgocenia tej izolacji. Głównym zagadnieniem naukowym pracy jest opracowanie nowej metody szacowania zawartości wilgoci za pomocą pomiarów rezystancji stałoprądowej układu izolacyjnego transformatora. We wstępie pracy nakreślona została problematyka wzrostu zawilgocenia izolacji w czasie eksploatacji transformatorów i zarysowany został obecny stan wiedzy dotyczący metod pomiarowych stopnia zawilgocenia. Podano także zwarty opis zjawisk fizycznych, które wykorzystano w pracy do opracowania nowej metody szacowania zawartości wilgoci. Wstęp zawiera także cel pracy, którym jest badanie zależności konduktancji stałoprądowej izolacji papierowo-olejowej przy zmianach temperatury, zawilgocenia i natężenia pola elektrycznego, a następnie opracowanie na podstawie uzyskanych wyników metody szacowania stopnia zawilgocenia izolacji transformatorów. Następnie postawiono tezę pracy, zakładającą że badania stałoprądowe rezystancji izolacji pozwolą na opracowanie sposobu wyznaczania stopnia jej zawilgocenia. Po tezie wymieniono zakres pracy w postaci wykazu zadań do zrealizowania. Uważam, że



zarówno wybór celu, jak i określenie tezy pracy zostały uzasadnione we wprowadzeniu i sformułowane jasno. Opierają się one o aktualne problemy badawcze w zakresie diagnostyki transformatorów, a więc niewątpliwie zawierają się w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika (AEiE). Jedyne niejasny wstępu fragment dotyczy zakresu wykorzystanych do badań próbek izolacji o różnym stopniu zawilgocenia (str. 16, ostatni akapit). Autor pisze, że zbadał próbki o zawilgoceniu od 1,4% do 5,8% (10 poziomów zawilgocenia), a następnie rozszerzając zakres badań o nowe parametry ograniczył je do czterech sztuk w zakresie 1,15% do 4,9%. Pomijając brak wyjaśnienia dla decyzji o ograniczeniu liczby próbek, drugi zakres nie zawiera się w pierwszym, trudno więc mówić o ograniczeniu zakresu. Być może jest to wynik błędu edytorskiego. Pozostała część wstępu zawiera opis zawartości kolejnych rozdziałów rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi – „Materiały izolacyjne stosowane w transformatorach” – opisuje wybrane materiały stosowane w izolacji transformatorów energetycznych. Przedstawiono charakterystykę kolejno mineralnego oleju izolacyjnego, estrów naturalnych i syntetycznych oraz papieru i preszpanu. Dodatkowo opisano metodologie przygotowywania izolacji stało-ciekłej. W rozdziale tym brakuje moim zdaniem opisu papieru aramidowego, który stosuje się jako izolację stałą w transformatorach w zastępstwie papieru. Autor w pracy bada izolację opartą na papierze celulozowym oraz oleju mineralnym. Mimo to w rozdziale drugim opisuje inne ciecze izolacyjne, zresztą podkreślając ich bardzo dobre parametry. Naturalnym więc byłoby opisanie także stosowanego coraz szerzej zamiennika dla papieru i preszpanu opartego na celulozie.

Rozdział trzeci nosi tytuł „Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej”. Omówiono w nim metody stosowane do badań stanu izolacji stało-ciekłej transformatorów energetycznych. Podzielono je na kilka grup, a dokładniej opisano metody polaryzacyjne, tj. RVM (pomiar napięcia powrotnego), PDC (analiza prądów polaryzacji i depolaryzacji) i FDS (spektroskopia w dziedzinie częstotliwości) oraz chromatografię gazową oleju (DGA). Uważam ten wybór za słuszny, gdyż metody te są obecnie najczęściej stosowane do zaawansowanej diagnostyki stanu izolacji transformatorów w celu określenia jej zawilgocenia i stopnia zesterzenia. W rozdziale tym autor wśród metod pośrednich badania stanu izolacji wymienia metodę FRA (analiza odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora) uzasadniając to stwierdzeniem, że metoda ta „pozwała wykryć odkształcenia uzwojeń [...], które mogą być źródłem osłabienia właściwości mechanicznych izolacji na skutek zmian starzeniowych”. Sformułowanie to jest dość niejasne. Jeśli wykryjemy odkształcenia w transformatorze, niewątpliwie mamy problem z izolacją, która co najmniej ma inną geometrię (czyli np. mniejsze odstępki izolacyjne wpływające na jej wytrzymałość elektryczną), a być może mechaniczne uszkodzenia (jeszcze większy wpływ na wytrzymałość elektryczną). Ale nie jesteśmy w stanie powiedzieć czy dany transformator ma zesterzony papier lub olej, bo do deformacji dochodzi na skutek oddziaływania dużych sił, będących najczęściej skutkami oddziaływania prądów zwarciovych. Oczywiście zesterzenie papieru i utrata przez niego elastyczności zmniejsza wytrzymałość układu prasującego, więc w starszych jednostkach łatwiej o odkształcenie niż w nowych, przy założeniu takich samych sił oddziałujących na uzwojenie, jednak za pomocą metody FRA nie oszacujemy stopnia zesterzenia izolacji, jeśli nie doszło do deformacji uzwojeń.

Kolejny rozdział – czwarty – rozpoczyna część konstrukcyjno-badawczą pracy. Nosi on tytuł „Przygotowanie obiektów badań oraz stanowisko badawcze”. Zawarto w nim opis przygotowania próbek, m.in. ich wymiary, konstrukcję kondensatorów pomiarowych oraz sposób uzyskania równowagi termodynamicznej w próbkach papieru zaimpregnowanego olejem mineralnym. Czas kondycjonowania próbek zamkniętych hermetycznie po połączeniu odpowiednio zawilgoconego papieru z olejem wynosił sześć miesięcy, co uważam za dobrą i przemyślaną decyzję. W przypadku takich eksperymentów cierpliwość wynagrodzona zostaje stabilnymi warunkami pomiaru i powtarzalnością wyników. Dokładnie opisano proces zawilgacania papieru, który wcześniej poddano suszeniu próżniowemu. Następnie papier impregnowano olejem, o którym napisano jedynie, że jest „świeży”. Brakuje tu informacji na temat rzeczywistego stanu oleju, jego parametrów, a w szczególności zawilgocenia, które mogło wpłynąć na rzeczywisty poziom wilgoci izolacji po impregnacji papieru olejem. Drugi dyskusyjny problem widnieje w opisie rysunku 4.5, gdzie zawarto układ trójelektrodowy do pomiaru rezystywności skrośnej próbek. Elektrode nr 2 opisano jako napięciową, a elektrodę nr 3 jako pomiarową. W takim układzie ciężko określić pole powierzchni z jakiego elektroda pomiarowa (większa) „zbiera” pole elektryczne, a stosowanie uziemionego pierścienia wokół elektrody napięciowej nie ma większego sensu, bo w przestrzeni pomiędzy nimi wystąpi największe naprężenie elektryczne (lub porównywalne do naprężenia uzyskanego na badanej próbce, w zależności od zastosowanego dielektryka pomiędzy pierścieniem i elektrodą w nim zawartą). Elektrody te powinny być stosowane na odwrót: mniejsza elektroda, zamontowana wewnątrz uziemionego pierścienia, powinna być elektrodą pomiarową, a większa, oddzielona badaną próbka, elektrodą napięciową. W takim układzie dokonujemy pomiaru w obszarze pola jednorodnego, a jego niejednorodności i efekt krawędziowy niwelowany jest przez uziemioną elektrodę pierścieniową. Być może problem takiego opisu elektrod wynika z błędnego opisu, w przeciwnym razie należy się zastanowić czy „odwrotne” podłączenie elektrod nie wpłynęło na uzyskane wyniki.

Tytuł rozdziału piątego „Badania stałoprądowe preszpanu elektrotechnicznego impregnowanego olejem izolacyjnym oraz ich analiza z zastosowaniem elementów mechaniki kwantowej” jest sformułowany nieprecyzyjnie, gdyż nie chodzi w nim o analizę samych badań, co ich wyników. Niemniej jednak treść rozdziału zawiera ważne podstawy teoretyczne i kluczowe dla recenzowanej rozprawy wnioski dotyczące tzw. hoppingu elektronów. Na znajomości tego zjawiska oparto zaproponowaną metodę szacowania zawilgocenia izolacji transformatora. Za szczególnie interesujące uważam wyniki zawarte w podrozdziale 5.1 oraz na rysunkach 5.5 oraz 5.10, które obrazują wpływ zawilgocenia izolacji oraz jej temperatury na konduktywność stałoprądową preszpanu, co umożliwiło opracowanie wspomnianej metody szacowania zawilgocenia w izolacji transformatorów. Interesująca jest także analiza dotycząca powstawania nanokropel wody w otoczeniu celulozy i oleju, w tym określenie ich rozmiaru (średnia liczba molekuł wody  $n \approx 220$  i średnice ok. 2,3 nm).

Rozdział szósty zatytułowano „Analiza wpływu temperatury, natężenia pola elektrycznego oraz zawartości wilgoci na konduktancję stałoprądową izolacji transformatorów energetycznych”. Zawarto w nim szereg charakterystyk (podrozdział 6.1) zmian w czasie wartości prądu skrośnego płynącego przez zaimpregnowany preszpan w

zależności od parametrów zawartych w tytule rozdziału. Oceniam, że dobór tych charakterystyk oraz ich dokładna analiza w tekście jest poprawna i prowadzi do ważnych wniosków, które zawarto w podrozdziale 6.2. Najważniejszy z nich to stwierdzenie, że wpływ zawartości wody oraz natężenia pola elektrycznego na wartość energii aktywacji konduktancji badanych próbek jest pomijalnie mały. Dyskusyjna jest tylko uwaga ze str. 81 (drugie zdanie), iż „głównym źródłem zawilgocenia izolacji [...] jest wilgoć przenikająca z zewnątrz”. Cząsteczki wody powstają wewnątrz izolacji w procesie rozkładu łańcuchów celulozy i w ten sposób, w efekcie starzenia izolacji stalej zwiększa się jej zawilgocenie. Trudno więc ocenić, które źródło wilgoci jest dominujące, zależy to od konkretnego przypadku. Na stronie 82, drugi akapit od dołu, autor stosuje zwrot „Z naszych badań...”. Sugeruje on udział szerszego zespołu badawczego, jednak nie jest to wyjaśnione w tekście. W podrozdziale 6.3 opisano sprawdzenie wpływu konduktancji stałoprądowej oleju na konduktancję preszpanu, a de facto całego układu izolacyjnego. Okazuje się, że obecność oleju w preszpanie nie wpływa na jego przewodnictwo, a jego konduktywność jest zdeterminowana obecnością molekuł wody.

Wnioski płynące z rozdziału szóstego, dodatkowo opisane zwięźle w jego podsumowaniu (podrozdział 6.4) wykorzystano do „Opracowania sposobu oznaczenia zawartości wilgoci w elementach stałych układu izolacji ciekło-stałej transformatorów energetycznych”, o czym traktuje rozdział siódmy. Przedstawiono w nim na wstępie podstawy dotyczące geometrii i modeli izolacji transformatorów, na których oparto się w sformułowaniu nowej metody, którą opisano w podrozdziale 7.2. Tutaj po raz kolejny pojawiają się sformułowania o pracy szerszego zespołu, tym razem wymienionego (Politechnika Lubelska, ZUT w Szczecinie oraz OBRE z Piekar Śląskich, jednak brakuje jednoznacznego określenia wkładu autora w opisane badania. A wkład ten wynika z rozdziałów wcześniejszych i jest niepodważalny. Być może przez skromność autor nie podkreślił swojego nakładu pracy w przeprowadzeniu badań i opracowaniu nowej metody szacowania wilgoci. Kluczowym elementem tego rozdziału, jak i całej rozprawy, jest charakterystyka z rys. 7.5, stanowiąca podstawę do szacowania zawilgocenia izolacji papierowej transformatorów w oparciu o pomiary konduktancji stałoprądowej oraz pojemności. Metoda ta została opatentowana w Polsce.

Ostatni rozdział – ósmy – zawiera podsumowanie wyników; zebrano w nim w kolejnych punktach najważniejsze wnioski z wcześniejszych rozdziałów. Na koniec stwierdzono, iż cel pracy został osiągnięty, a teza została udowodniona. Po wnikliwej analizie rozprawy doktorskiej w pełni zgadzam się z tymi stwierdzeniami. Autor planuje dalsze badania prowadzić w kierunku analizy właściwości izolacji papierowo-estrowej. Proponuję również zastanowić się nad włączeniem w badania papieru aramidowego.

## 2. Uwagi ogólne

Recenzowana praca omawia problematykę określania stopnia zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej transformatorów. Cele pracy i teza zostały jasno określone i poparte analizą obecnego stanu wiedzy. Niewątpliwie poszukiwanie nowych, lepszych metod diagnostyki takiej izolacji jest aktualnym problemem badawczym, wpisującym się w zakres dyscypliny AEiE (a dawniej Elektrotechnika). Zawarte wyniki eksperymentalne, analizy teoretyczne oraz zaproponowana metoda szacowania wilgoci w oparciu o stałoprądową rezystancję stanowią niewątpliwie wkład w tę dyscyplinę nauki. Opisany przebieg



realizowanych prac badawczych prowadzi do słusznie wyciągniętych konkluzji. 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. W rozdziale czwartym opisano procedurę przygotowania próbek: suszenie, zawilgacanie i impregnowanie olejem, a następnie ich kondycjonowanie przez sześć miesięcy. Parametry papieru określono bardzo dokładnie, jednak na temat oleju napisano tylko iż jest „świeży [...] produkcji jednego z czołowych producentów”. Czy badano parametry oleju przed impregnacją? Czy parametry te, a zwłaszcza początkowe zawilgocenie oleju, mogły wpłynąć na zawilgocenie próbek po impregnacji (czyli izolacji papier-olej)?
- 2.2. Komentarza wymaga sposób opisanie elektrod kondensatora pomiarowego z rys. 4.5. Czy opisanie elektrody mniejszej jako napięciowej (umieszczonej wewnątrz uziemionej elektrody pierścieniowej), a większej jako pomiarowej jest zamierzone, czy jest to pomyłka redakcyjna? A jeśli jest zamierzone i tak wykonywano pomiary, to czy nie wpłynęło to na otrzymane wyniki, zgodnie z moimi wątpliwościami zawartymi w recenzji rozdziału czwartego (strona 3 tej recenzji)?
- 2.3. W rozdziale siódmym brakuje jednoznacznego określenia osiągnięć doktoranta wobec wymienionego składu zespołu wykonującego część badań. Moim zdaniem osiągnięcia te są znaczne i wynikają z wyników zawartych we wcześniejszych rozdziałach. Poproszę o komentarz autora.
- 2.4. Układ izolacyjny transformatora zazwyczaj nie jest w stanie równowagi termodynamicznej, o czym pisał także autor. Zmiany warunków otoczenia i obciążenia jednostki wpływają na różnice w lokalnych temperaturach i/lub rozkładzie wilgoci pomiędzy elementy składowe izolacji. Jak zaproponowana metoda poradzi sobie z szacowaniem wilgoci w układach izolacyjnych z nierównowagą termodynamiczną? Czy jej skuteczność będzie lepsza niż standardowych metod zaawansowanej diagnostyki stopnia zawilgocenia transformatorów?

### 3. Uwagi szczegółowe

Poziom edytorski pracy generalnie oceniam jako poprawny. Niestety w pracy występuje sporo literówek i błędów w formatowaniu tekstu, a także mnóstwo błędów interpunkcyjnych. Poniżej przedstawiam główne mankamenty edytorskie pracy, wraz z przykładami:

- liczne literówki i błędy stylistyczne w tekście, np. używanie formy pierwszoosobowej zamiast trzecioosobowej: „Do produkcji olejów [...] stosuję się” – str. 22 lub „Ze względu na coraz wyższe wymagania [...] tj. wyższa temperatura pracy [...itd.]” – str. 24;
- liczne błędy interpunkcyjne, głównie w stosowaniu przecinków, np. „Niniejsza rozprawa doktorska składa się z, wykazu[...]” – str. 18;
- stosowanie wymiennie myślników i łączników, np. „celuloza – olej mineralny – woda” zamiast „celuloza-olej mineralny-woda” – str. 14;
- błąd na rysunku 2.1: „atomatyczny” zamiast „aromatyczny”, w tekście jest poprawnie;



- czy na stronie 32 sformułowania „absorpcja” oraz „adsorpcja” użyto celowo, czy jest to wynik literówki?
- stosowanie zamiennie oznaczeń  $i_{pol}$ ,  $I_{pol}$ ,  $I_{pol}$ ,  $J_{pol}$  oraz  $i_{pol}$  (odpowiednio strona 42 – tekst, rys. 3.2, rys. 3.3, rys. 3.5 oraz rys. 3.7);
- na wykresie z rys. 3.5 pojawia się krzywa oznaczona jako  $J_{rez}$ . Pod rysunkiem i w tekście nie ma wyjaśnienia co to za wielkość i co przedstawia wykres;
- podobnie jest na stronie 47: oznaczenie  $U_R$  w tekście i  $V_r$  na rysunku;
- stosowanie zamiennie  $tg\delta$  i  $\tan\delta$  – strona 49 (rys. 3.9 oraz tekst);
- na rys. 5.1 pojawia się prąd  $I_R$ , a w jego opisie  $I_p$ ;
- we wzorze (5.1) występuje  $R_C$ , a w opisie wzoru już  $R_p$ ;
- sformułowanie z rozdziału siódmego „pomiarzy na częstotliwościach” nie brzmi dobrze;
- ze spisu literatury nie znalazłem w tekście cytowania pozycji [5, 47, 65 oraz 109]. Szczególnie brak pozycji [65] dziwi, bo to ważna publikacja w dorobku autora. Zapewne to edytorskie przeoczenia.

Powyższe uwagi natury redakcyjnej nie obniżają poziomu merytorycznego pracy, jednak stanowią utrudnienie dla czytelnika.

#### 4. Ocena ogólna i podsumowanie

Praca doktorska, pomimo niedociągnięć redakcyjnych, 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. Uważam, że wykazano w pracy iż zadania zrealizowane przez doktoranta umożliwiły opracowanie zaprezentowanej nowej metody diagnostycznej. Przeprowadzenie badań (i ich wcześniejsze przygotowanie) na 169 próbkach wymagało dużego nakładu pracy i staranności badawczej. Analiza wyników poparta została solidnymi podstawami teoretycznymi i doprowadziła do wartościowych konkluzji. Ostatecznie opracowana została nowa metoda szacowania zawilgocenia izolacji transformatorów w oparciu o pomiary stałoprądowej rezystancji.

Uważam rozprawę za ważny wkład do badań nad zjawiskami zachodzącymi w transformatorach, a wszystkie wnioski naukowe oraz technologiczne za pomocne w diagnostyce transformatorów. Jestem przekonany, że proponowana metoda zostanie wdrożona do praktyki przemysłowej. 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 i Elektrotechnika. Pomimo zgłoszonych przeze mnie uwag o charakterze dyskusyjnym, rozprawa doktorska mgr. inż. Konrada Kierczyńskiego jednoznacznie spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i może być dopuszczona do publicznej obrony.

