

Łódź, 24.08.2023

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

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Patryka Bohatyrewicza „Zastosowanie indeksu zdrowia do wstępnej oceny stanu technicznego oraz analizy zmian starzeniowych transformatorów energetycznych”

1. Podstawa prawna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja sporządzona została na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, dr hab. inż. Pawła Dworaka, prof. ZUT, zgodnie z uchwałą nr 15 z dnia 30.06.2023 roku.

2. Tematyka i teza rozprawy

Transformatory energetyczne są najistotniejszym, krytycznym elementem infrastruktury elektroenergetycznej na każdym niemal poziomie napięć. Bez poprawnej pracy transformatora nie jest możliwe niezawodne przesyłanie energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych przesyłowych i dystrybucyjnych. Każde nieplanowane wyłączenie transformatora wiąże się z niedostarczeniem energii elektrycznej do odbiorcy końcowego, a więc i stratami finansowymi zarówno dla odbiorcy energii jak i dystrybutora. Transformatory są też niezbędne do połączenia miejsca wytwarzania energii elektrycznej z siecią (transformatory blokowe). Z uwagi na ciągle zwiększające się moce układów turbin wiatrowych (rynek morskich farm wiatrowych w ostatnich latach rozwija się bardzo dynamicznie, a moce transformatorów sięgają już 500MVA), a tym samym co raz to wyższe napięcia sieci, którymi przesyła się energię z farm wiatrowych do systemu elektroenergetycznego, także i w tym obszarze transformatory energetyczne uznaje się za kluczowe elementy w obszarze wytwarzania energii elektrycznej.

Większość transformatorów zainstalowanych w systemie elektroenergetycznym to transformatory o tzw. izolacji papierowo-olejowej, które stanowią znakomita większość ogólnej liczby transformatorów eksploatowanych zarówno w kraju jak i za granicą. Podstawowymi elementami układu izolacyjnego takich transformatorów są olej elektroizolacyjny oraz papier, najczęściej celulozowy. Dodatkowo, w układzie izolacyjnym spotkać można również elementy tzw. izolacji twardej w postaci np. preszpanu. W przypadku olejów elektroizolacyjnych, których główną



funkcją oprócz funkcji izolacyjnej jest też funkcja chłodząca, najczęściej stosowanym medium ciekłym jest olej mineralny. W ostatnich latach, chcąc dostosować jednak jednostki transformatorowe do wymogów ekologicznych, a także móc uznać je za urządzenia spełniające kluczowe wymagania w zakresie polityki zrównoważonego rozwoju, zaczęto stosować w transformatorach biodegradowalne płyny izolacyjne takie jak estry syntetyczne i estry naturalne. Zastosowanie w transformatorach znajdują też produkty nowatorskie jak tzw. biowęglowodory pochodzenia roślinnego oraz ciecze wytwarzane w technologii GTL (gas-to-liquid). W każdym jednak przypadku podstawowe funkcje dielektryczne i chłodzące każda z wymienionych typów cieczy spełnia zgodnie ze stawianymi jej wymaganiami normatywnymi.

Jak już zaznaczono wyżej, kluczowym zagadnieniem w eksploatacji transformatorów, niezależnie od miejsca ich zainstalowania oraz typu zastosowanej w nich cieczy dielektrycznej, jest poprawne określenie ich aktualnego stanu technicznego, tak aby zapobiec nieplanowanym wyłączeniom, np. wskutek zaistniałej awarii. Zagadnienie oceny stanu technicznego transformatorów jest szczególnie ważne, gdy populacja transformatorów zarządzana przez daną spółkę jest duża. W takim wypadku odpowiednio wczesne wykrycie anomalii w pracy danej jednostki jest kluczowe dla skutecznej gospodarki zasobami takiej spółki. Pogorszenie się stanu technicznego transformatora może wynikać zarówno ze zdarzeń występujących w sieci elektroenergetycznej (zwarcia, przeciążenia, przepięcia itp.), ale przede wszystkim z naturalnych procesów starzeniowych izolacji papierowo-olejowej. Biorąc pod uwagę aktualną strukturę wiekową eksploatowanych w Polsce jednostek transformatorowych, można założyć, że w niedalekiej przyszłości może nastąpić stopniowy wzrost ich awaryjności, a więc skuteczna diagnostyka stanu technicznego, mająca na celu jak najwcześniejsze wykrycie anomalii, jest pożądana. Kluczowe pytanie w kontekście diagnostyki transformatorów w eksploatacji dotyczy przewidywania momentu, w którym dana jednostka powinna zostać wycofana z eksploatacji. Odpowiednio wczesne oszacowanie takiego momentu może dać czas spółce zarządzającej majątkiem transformatorowym na podjęcie efektywnych działań w zakresie zaplanowanych prac remontowych czy wymiany urządzeń zainstalowanych w sieci.

Obecnie stosowanych jest kilka podejść do oceny stanu technicznego transformatora w eksploatacji, a krajowe wytyczne w tym zakresie bazują w większości na opracowanej przez grono eksperckie Ramowej Instrukcji Eksploatacji Transformatorów. Należy jednak zaznaczyć, że spółki zarządzające eksploatacją transformatorów opracowują często własne wymagania w tym zakresie, próbując zoptymalizować sposób oceny, uwzględniając własne doświadczenie i wiedzę ekspercką, a także wspomagając się wiedzą ekspercką kadry naukowo-badawczej uczelni technicznych. Niewątpliwie jednak, każde podejście do diagnostyki transformatorów w eksploatacji, w pierwszej kolejności związane jest z oceną parametrów fizyko-chemicznych oleju izolacyjnego



wypełniającego daną jednostkę. Zestaw wartości takich parametrów poparty wynikami analizy chromatograficznej gazów rozpuszczonych w próbce oleju pobranego z transformatora jest w stanie dostarczyć informacji o aktualnym stanie technicznym całego układu izolacyjnego, w tym o stopniu zesterzenia izolacji papierowej.

Mimo, że w ostatnich latach nastąpił intensywny rozwój w zakresie diagnostyki transformatorów energetycznych (łączenie kilku metod diagnostycznych ze sobą, wprowadzanie elementów sztucznej inteligencji), to w dalszym ciągu poszukiwane są nowe rozwiązania i każde z nich jest zawsze z dużym zainteresowaniem analizowane przez spółki zarządzające majątkiem sieciowym. Szczególnie istotne w tym aspekcie jest wyznaczenie jak najbardziej miarodajnych wskaźników diagnostycznych, które z jak największą dokładnością odzwierciedlały by rzeczywisty stan techniczny transformatora. Błędnie zinterpretowane wyniki badań diagnostycznych mogą bowiem doprowadzić do uznania prawidłowo pracującej jednostki za wymagającą modernizacji lub odwrotnie, transformator o dużym ryzyku awarii mógłby zostać pozostawiony do dalszej eksploatacji.

Dlatego też, propozycja rozwiązania zaproponowanego przez doktoranta, w postaci opracowania wskaźnika noszącego nazwę „indeks zdrowia”, który na bazie danych dotyczących wyznaczonych parametrów próbki oleju transformatorowego wypełniającego daną jednostkę potrafi, dzięki zastosowanemu algorytmowi, wskazać stany alarmowe i awaryjne w danej jednostce, doskonale wpisuje się w wyżej przedstawione trendy badań z obszaru diagnostyki transformatorów, a więc szeroko pojętej Elektroenergetyki. Innymi słowy, tematykę pracy doktorskiej mgr inż. Patryka Bohatyrewicza pt. „Zastosowanie indeksu zdrowia do wstępnej oceny stanu technicznego oraz analizy zmian starzeniowych transformatorów energetycznych” należy uznać za aktualną i wpisującą się w obszar dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Realizacja pracy doktorskiej bazowała na dwóch tezach o brzmieniu:

„Istnieje możliwość skutecznej oceny zmian stanu technicznego transformatorów mocy w oparciu o powszechnie stosowane metody diagnostyczne oleju elektroizolacyjnego”,

oraz

„Na podstawie archiwalnych wyników badań diagnostycznych oraz analizy populacyjnej transformatorów możliwe jest określenie, jakie wartości zmian indeksu zdrowia między kolejnymi sprawdzeniami są zagrożeniem dla bezpiecznej pracy jednostki”.

Drogą do udowodnienia postawionych tez stał się założony przez doktoranta zakres prac, który obejmował:

- analizę teoretyczną zagadnień związanych z tematyką pracy skupioną na budowie transformatora energetycznego, zagrożeniach transformatorów wynikających z eksploatacji,

diagnostyce cieczy izolacyjnych, metodach stosowanych do zarządzania populacją transformatorów;

- opracowanie algorytmu szacowania wskaźnika diagnostycznego o nazwie „indeks zdrowia” uwzględniającego wybrane parametry oleju elektroizolacyjnego;

- sprawdzenie opracowanego algorytmu na wcześniej scharakteryzowanej grupie badawczej 233 transformatorów różnego przeznaczenia (blokowych, hutniczych, dystrybucyjnych, przemysłowych) i o różnej charakterystyce z punktu widzenia czasu ich eksploatacji;

- oszacowanie zmienności wartości indeksu zdrowia w celu wyznaczenia wytycznych do oceny zmian wartości tego indeksu wraz z propozycją warunków progowych dla progów stanu alarmowego i stanu awarii;

- weryfikację opracowanego algorytmu na bazie przypadków rzeczywistych transformatorów i różnych scenariuszy pogorszenia się ich stanu technicznego.

Zaproponowane tezy rozprawy, a także bliski zagadnieniom praktycznym charakter prac zaplanowanych do realizacji przez doktoranta należy ocenić jako poprawne. Niemniej pierwsza z tez, zdaniem recenzenta, wydaje się być sformułowana zbyt ogólnie. Jest bowiem powszechnie wiadomo, że ocena zmian stanu technicznego transformatora jest możliwa na bazie dokonywanych okresowo przeglądów czy prowadzonych pomiarów parametrów oleju (w tym gazów w nim rozpuszczonych). Przykładowo, wspomniane metody DGA dosyć skutecznie wskazują na potencjalne źródła defektów izolacji, które ma swoje odzwierciedlenie w generowaniu coraz to większej ilości specyficznych gazów. Stąd, uznając naukową istotę i techniczne znaczenie podjętego przez doktoranta zagadnienia uważam, iż tezę tą można było sformułować bardziej precyzyjnie, wskazując cechy charakterystyczne przyjętych założeń tworzonego wskaźnika indeksu zdrowia. Uwaga ta nie ma oczywiście wpływu na ogólną pozytywną ocenę podjętej tematyki, przyjętego zakresu pracy i sformułowanych tez. Praca ma odniesienie do rzeczywistych problemów gospodarki z obszaru Elektroenergetyki, dla której niezawodność urządzeń eksploatowanych w systemach elektroenergetycznych, jakimi są transformatory, jest niezwykle ważnym zagadnieniem, szczególnie z punktu widzenia zarządzania dostawami energii elektrycznej do odbiorców końcowych. Predykcja możliwych stanów alarmowych czy awaryjnych mogących wystąpić w transformatorach na bazie oceny zmian wskaźnika indeksu zdrowia, jest w pracy elementem, który należy bez wątplenia uznać za oryginalny i wnoszący wkład w rozwój wyżej już wspomnianej dyscypliny naukowej.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Rozprawa opracowana została w języku polskim i zawiera 151 stron. Podzielona została ona na 10 zasadniczych rozdziałów poprzedzonych krótkimi streszczeniami w języku polskim i



angielskim, wykazem skrótów i oznaczeń zastosowanych w pracy, ogólnym wprowadzeniem oraz przedstawieniem tez i zakresu pracy (wszystkie przytoczone części pracy nie posiadają numeracji jako rozdziały). Rozprawa zakończona jest natomiast bibliografią zestawioną w kolejności alfabetycznej (133 pozycje) oraz spisem tabel i rysunków. Układ pracy 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. Jakkolwiek, w subiektywnej ocenie recenzenta lepszą strukturą pracy doktorskiej jest ta, gdzie doktorant najpierw przedstawia szereg aspektów teoretycznych związanych z zakresem pracy, a następnie na tle przedstawionej teorii formułuje problem i prezentuje tezy. Niemniej, propozycja struktury przedstawionej przez doktoranta jest także szeroko stosowana, stąd nie podnoszę formalnie uwagi w tym zakresie.

Wobec powyższego można uznać, że oceniana praca ma typową strukturę, w której wyodrębnić można część teoretyczną oraz część autorską / badawczą.

W pierwszej części doktorant skupia się na przedstawieniu, w sposób przystępny, ogólnej budowy transformatora jako urządzenia elektrycznego z podziałem na część aktywną, izolacyjną oraz wyposażenie (rozdział 1). W kolejnym z rozdziałów doktorant opisuje zagrożenia eksploatacyjne transformatorów dzieląc je na typowe defekty występujące wewnątrz transformatora oraz te związane z awarią jego osprzętu (m.in. izolatorów przepustowych czy przełącznika zaczepek). Rozdział uzupełnia krótki opis dotyczący statystyki awaryjności transformatorów przedstawiony na bazie broszury CIGRE o numerze 642. W rozdziale 3 doktorant skupia się z kolei na wykazaniu, że konkretne właściwości fizyko-chemiczne oleju izolacyjnego mogą świadczyć o stanie całego urządzenia, a więc możliwa jest diagnostyka urządzenia na bazie diagnostyki samego oleju. W swoim opisie doktorant uwzględnia parametry fizyko-chemiczne oleju, ocenę gazów rozpuszczonych w pobranej z transformatora próbce, ocenę związków furanu, a także innych, rzadziej stosowanych w praktyce inżynierskiej właściwości. W dalszej części pracy (rozdział 4) pojawia się opis ogólnego podejścia do zarządzania populacją transformatorów. Autor odnosi się tu do działań prowadzonych w tym zakresie przez firmę Energo-Complex, co nie jest oczywiście uwagą krytyczną, gdyż wzmiankowana firma posiada wieloletnie doświadczenie w prowadzeniu działań diagnostycznych w zakresie transformatorów energetycznych różnych poziomów napięć i mocy. Najistotniejszym elementem tego rozdziału jest z pewnością dosyć szczegółowe przedstawienie problematyki i rozwiązań w zakresie zastosowania indeksów zdrowia w kontekście ustalania stanu technicznego transformatora w eksploatacji. Jak wspomniano wyżej, w opinii recenzenta, to właśnie po tym rozdziale idealnym byłoby wskazanie celowości badań nad autorskim rozwiązaniem doktoranta, co wprowadziło by większą spójność całej pracy. Niemniej,

przedstawiając część teoretyczną pracy doktorant udowodnił, że **posiada ugruntowaną wiedzę teoretyczną z zakresu tematyki rozprawy i jest przygotowany do realizacji części praktycznej.**

Za najważniejszą część rozprawy należy uznać oczywiście rozdziały od 5 do 10. W nich to doktorant przedstawia kolejne kroki jakie zrealizował zmierzając do udowodnienia założonych tez. W pierwszej kolejności doktorant zaprezentował założenia algorytmu tworzonego indeksu zdrowia. Algorytm bazował na trzech głównych składowych tj. wartościach pomierzonych parametrów fizyko-chemicznych oleju, wynikach analizy kluczowych gazów palnych rozpuszczonych w oleju, a także wynikach badań stopnia zesterzenia izolacji stałej, dodajmy, że bazujących także na wynikach dotyczących oleju (stężenie tlenu i dwutlenku węgla oraz 2-furfuralu). Istotą propozycji doktoranta było uzyskanie jak najwyższej czułości na zmiany parametrów wejściowych (wartości uzyskanych z pomiarów) zawierających się w założonych zakresach diagnostycznych. Jednocześnie doktorant założył, że w ramach zaproponowanego rozwiązania możliwe będzie nie tylko śledzenie zmiany samej wartości indeksu zdrowia, ale, dla celów poznawczych, także i jego komponentów w zakresie trzech wyżej wymienionych składowych. Doktorant zachował logikę prezentacji algorytmu, ale przedstawione w rozdziale 5.2 kryteria nie są jednak w pełni jasne. Przykładowo, nie zawsze wiadomo z czego wynika przyjęcie danej wagi lub jak finalnie liczona jest wartość indeksu zdrowia; z wag dla poszczególnych podindeksów (Tabela 5.10) czy wag parametrów (tabela 5.11). Z kolei same kryteria oceny (rozdział 5.3) są przedstawione na byt dużym poziomie ogólności. W zakresie prezentacji rozdziałów 5.2 i 5.3 pozostaje więc pewne niedopowiedzenie i do tej części mam najwięcej uwag, które przedstawione zostaną w dalszej części recenzji. W rozdziale 6 doktorant charakteryzuje populację transformatorów stanowiącą grupę poddaną badaniu. Uważam, że przyjęta populacja odzwierciedla w dużym stopniu aktualny stan ogólnej populacji jednostek transformatorowych w kraju, zarówno z punktu widzenia rozkładu wieku transformatorów jak ich mocy znamionowych. Rozdział 7 to z kolei wstępna analiza zebranych wyników z podziałem na typy transformatorów. Dla każdej z grup, na bazie wcześniej wypracowanego algorytmu, doktorant przedstawił wyniki w postaci graficznej jako zależności wartość indeksu zdrowia od czasu eksploatacji urządzenia, a ściślej jego wieku. Dla zestawionych wyników dobrał funkcje regresji (liniowej i wielomianowej), a całość skomentował. W opinii recenzenta komentarz mógłby być bardziej szczegółowy i uwzględniać rozkład danych w kolejnych grupach wiekowych. Doktorant mógłby na przykład odpowiedzieć na pytanie, jaki jest udział procentowy w danym przedziale wieku transformatorów jednostek o danym stanie technicznym względem ogólnej liczby w danym przedziale i porównać te wyniki właśnie z punktu widzenia wieku eksploatowanych jednostek. Takie podejście wskazałoby, czy wraz z postępującym czasem eksploatacji pojawia się faktyczna różnica we wzroście jednostek o „miernym” i „ryzykownym” stanie technicznym. Na niektórych grafikach widać bowiem, że nawet krótki czas eksploatacji może przynieść spore wartości indeksu

zdrowia (Rys. 7.1 i wiek z przedziału 0-10). Uważam, że zdecydowanie wzmocniłoby to merytorycznie obszar dyskusji wyników. Ponadto, mimo wprowadzenia w rozdziale 5 podziału transformatorów ze względu na ich znaczenie dla systemu („krytyczność”), w rozdziale 7 brak jest uwzględnienia tego faktu w dyskusji. Jak poprzednio, uważam, że byłaby to wartość dodana do rozważań zaprezentowanych przez autora. Przechodząc do rozdziału 8, doktorant przedstawia w nim analizy dotyczące zmian indeksu zdrowia wskutek rocznych przyrostów wartości parametrów uwzględnianych w trzech wytypowanych wcześniej podindeksach. Analizy są interesujące i można powiedzieć, że stanowią clue pracy. Doktorant proponuje bowiem charakterystyczne wartości progu alarmowego i awaryjnego dla przyrostów wartości indeksu zdrowia uzasadniając je opisowo. Szkoda, że autor nie pokusił się o tabelaryczne zestawienie tych wartości, co znacząco poprawiłoby by czytelność i uwypukliło osiągnięcie doktoranta. W rozdziale 9, kończącym zasadniczą część badawczą, następuje weryfikacja algorytmu na bazie przykładów praktycznych z uwzględnieniem trzech typowych, zdaniem doktoranta, możliwych scenariuszy eksploatacyjnych: normalna eksploatacja, starzenie przyspieszone i awaria. W opisie autor ponownie stosuje pewne skrótowe myślowe uniemożliwiające niekiedy precyzyjne podążanie za przedstawionymi danymi. Główną wadą przedstawionego opisu jest brak jednoznacznego odniesienia do faktu, na jakiej podstawie wyznaczono w każdym przypadku (rysunki 9.1 do 9.7) prostą oznaczoną jako tzw. wartość symulowaną. Autor przytacza te proste i omawia ich zgodność bądź rozbieżność z wynikami rzeczywistymi, ale nie odnosi się w żadnym przypadku do źródła, na podstawie którego wyznaczono dana prostą. W analizie przedstawionych przypadków trudno też znaleźć odniesienie do rozważań z rozdziału 8, gdzie doktorant wskazywał na przyrosty wartości indeksu zdrowia jako wskaźników alarmowych i awaryjnych, dlaczego? W dalszej części tego rozdziału, gdzie omawiane są przypadki dotyczące wad fabrycznych i wpływu zabiegów konserwujących olej na wartość indeksu zdrowia, autor prezentuje natomiast przypadki o dużej rozbieżności pomiędzy stanem rzeczywistym a wskazaniem indeksu zdrowia z symulacji. Rozważania te podsumowuje stwierdzeniem, że wskutek nagłych zmian indeksu zdrowia pojawiają się trudności w jednoznacznym określeniu predykcji trendu zmian tego wskaźnika. Część autorską pracy kończy rozdział „Podsumowanie i wnioski”, w którym autor podsumowuje swoją pracę. Zdecydowanie brakuje tu wypunktowania konkretnych osiągnięć stanowiących wkład doktoranta w obszar badawczy, w którym się poruszał.

Mimo pewnych niedociągnięć w zaprezentowanym opisie, doktorant potwierdził jednak, że tematyka którą omawia nie jest mu obca i dobrze rozeznaje rzeczywiste problemy eksploatacyjne i diagnostyczne związane z transformatorami energetycznymi o izolacji papierowo-olejowej. **Można więc uznać, że uzyskane przez doktoranta wyniki są oryginalne i wnoszą wkład w obszar badawczy dotyczący diagnostyki transformatorów energetycznych o tzw. izolacji papierowo-**

olejowej. Doktorant, poprzez wykonane analizy wyników badań próbek oleju pobranych z 223 transformatorów różnego typu, stworzył oryginalne narzędzie umożliwiające predykcję stanu technicznego transformatora. Wobec tego udowodnił tezy postawione w pracy. Rozprawę doktorską mgr inż. Patryka Bohatyrewicza można więc uznać za spełniającą w stopniu wystarczającym kryteria dotyczące prac doktorskich z obszaru dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

4. Uwagi, pytania, zagadnienia dyskusyjne

Praca jest napisana poprawnym językiem i zawiera niewielką tylko liczbę błędów natury stylistycznej czy typograficznej. Te nie zostały wskazane w recenzji ze względu na ich marginalne znaczenie dla oceny pracy. Edytorska strona pracy również nie wzbudza większych zastrzeżeń. Niemniej w kontekście merytorycznym, pojawiło się kilka istotnych zagadnień, które w opinii recenzenta wymagają od doktoranta szczegółowych wyjaśnień. Przedstawione uwagi oraz pytania dyskusyjne podzielone zostały na dwie części, dotyczące części teoretycznej pracy oraz autorskich badań i analiz doktoranta.

4.1. Uwagi dotyczące części teoretycznej pracy

- 1) W kilku przypadkach autor przytacza rysunki pochodzące ze źródeł obcych. Niestety ich jakość nie jest najlepsza. Przykładami w tym zakresie są m.in. rys. 1.3 (który w moim odczuciu powinien zostać przygotowany samodzielnie przez doktoranta i przedstawiony jako tabela), rys. 1.14 czy rys. 1.15 (tu część opisowa powinna znaleźć się w podpisie rysunku). Na pochwałę zasługują natomiast identycznie przygotowane tabele.
- 2) W pierwszym akapicie rozdz. 1.2 autor używa sformułowania „sprawność tego systemu (izolacyjnego)”. Myślę, że trafniejszym określeniem byłoby „niezawodność”.
- 3) Trzeci akapit rozdz. 1.2 jest napisany niejasno. Wynika z niego, że „izolacja papierowa stosowana jest jako kliny lub przekładki dystansowe”. Ponadto, w tym samym akapicie doktorant wskazuje, że „papier prasowany w różnych formach” to „Pressboard czy Transformerboard” używając w tym samym zdaniu wcześniej nazwy „preszpan”. Tłumaczeniem z ang. słowa „pressboard” jest właśnie „preszpan”, a więc są to synonimy. Na bazie powyższego przykładu sugeruje się nieco bardziej wnikliwe podejście do formułowania ogólnych myśli dotyczących elementów układu izolacyjnego transformatora w przyszłości.
- 4) Proszę doktoranta o zweryfikowanie informacji ze str. 19, gdzie stwierdza on, że wytrzymałość dielektryczna papieru wynosi 12 kV/mm, oleju 40 kV/mm, a układu papierowo-olejowego 64 kV/mm. Dane mimo, że pochodzą z uznanej publikacji są błędne,

jeśli dokładnie nie określimy warunków wyznaczania wspomnianych wartości i nie zdefiniujemy czym jest układ papierowo-olejowy, do którego się odnosimy. Proszę pamiętać, że papier czy preszpan ma zmienną wytrzymałość elektryczną w zależności od grubości. Przykładowo wytyczne odpowiedniej normy dotyczącej preszpanów izolacyjnych wskazują, że preszpan o grubości 1 mm po impregnacji powinien mieć minimalną wytrzymałość elektryczną na poziomie 45 kV/mm, podczas gdy preszpan o grubości 3 mm już tylko 30 kV/mm. Z tekstu nie wynika, czy wskazane 12 kV/mm dotyczy papieru suchego czy impregnowanego, a to zasadniczo zmienia ocenę. Podobnie 40 kV/mm dla oleju jest wartością wątpliwą. Jeśli weźmiemy typowy układ z normy IEC (2,5 mm i układ dwóch elektrod grzybkowych) to otrzymamy, że napięcie przebicia do osiągnięcia wytrzymałości elektrycznej rzędu 40 kV/mm powinno wynosić 100 kV w takim układzie. Typowo wartości są znacznie niższe, a wartość 100 kV może być uzyskana, ale dla oleju o czystości laboratoryjnej, który jest perfekcyjnie odgazowany i pozbawiony wilgoci i zanieczyszczeń. W warunkach przemysłowych oleje przed zalaniem transformatora osiągają wartości napięcia przebicia ok. 90 kV, co daje wytrzymałość elektryczną rzędu 36 kV/mm.

- 5) Str. 22 i Tabela 1.2 - prawidłową nazwą przytaczanego estru naturalnego jest Envirotemp FR3 – Cargill to nazwa firmy produkującej tę ciecz.
- 6) Opisując defekty wewnętrzne (rozdział 2.1) czytelniejszym byłoby opracowanie grafiki, na której defekty te zostałyby wyszczególnione; taki podział byłby łatwiejszy do przyswojenia dla czytelnika niż suchy opis.
- 7) Autor w rozdz. 3.1 powinien wyraźnie zaznaczyć w opisie oraz załączonych tabelach, że rozważania dotyczą tylko i wyłącznie cieczy pochodzenia węglowodorowego, a więc spełniającego kryteria normy IEC 60296. W tym samym rozdziale autor wskazuje na wymagania krajowe w zakresie właściwości olejów izolacyjnych typu mineralnego w postaci RIET. Tu chciałbym zaznaczyć, że RIET nie ma wagi dokumentu określającego wymagania, a jedynie przedstawia eksperckie sugestie w tym zakresie bazujące w większości na w/w normie.
- 8) W rozdziale 3 brakuje ogólnej uwagi, że przedstawione wytyczne dotyczą tylko i wyłącznie olejów pochodzenia węglowodorowego. Ponieważ autor wzmiankował stosowanie płynów alternatywnych w rozdziale 2 dobrze by było, gdyby pojawiła się nawet krótka informacja, że wytyczne są inne dla cieczy estrowych, zarówno w zakresie podstawowych parametrów fizyko-chemicznych jak i np. typowych stężeń gazów rozpuszczonych w metodzie DGA.

- 9) Na str. 75 pojawia się sformułowanie „najwyższym napięciem urządzenia”, które, zdaniem recenzenta powinno być zastąpione bardziej trafnym technicznie sformułowaniem „najwyższe napięcie robocze”.
- 10) Rysunki od 7.1 do 7.10 w wersji drukowanej pracy utrudniają znacząco rozeznanie pomiędzy stanem „Mierny” a „Ryzykowny”. Zdaję sobie sprawę, że w prezentacji wyników założony został postęp kolorów w stronę koloru czerwonego odpowiadającego najgorszemu stanowi, czyli „Ryzykowny”, ale przy tak przedstawionych wykresach niestety można pogubić w ich interpretacji.

4.2. Uwagi dotyczące części autorskiej / badawczej

- 1) Z analizy rozdziału 5 nie wynika bezpośrednio, w jaki sposób dobrano wagi; opis jest niestety zbyt mało precyzyjny. Przykładowo, dlaczego waga „napięcia przebicia” to 0,14 a nie na przykład 0,19 a „liczby kwasowej” 0,42 a nie 0,44? To samo dotyczy oczywiście pozostałych przypadków. W tym samym zakresie pojawia się pytanie jak wyznaczono postaci funkcji z Tabel 5.3 do 5.5, a także 5.7 i 5.9? Dlaczego podano wartości z dokładnością do ośmiu miejsc po przecinku, czy jest to uzasadnione z punktu widzenia rozpatrywanego problemu?
Uważam, że kwestia powyżej powinny zostać wyjaśnione znacznie precyzyjniej, szczególnie podczas publicznej obrony, gdyż sam algorytm jest przecież najistotniejszym elementem niniejszej pracy doktorskiej, a opis jego konstrukcji jest mocno nieprecyzyjny.
- 2) W kontekście przypisywania wag do poszczególnych parametrów (Tabele 5.3, 5.4 i 5.5) nasuwa się pytanie czy doktorant nie rozważał zastosowania jakiejś metody matematycznej do określenia wag, przy jednoczesnym wykorzystaniu wiedzy eksperckiej osób zajmujących się diagnostyką transformatorów? Przykładem takiej metody hierarchizacji może być metoda AHP, która pozwala, w pewnej jej części, na przypisaniu wag poszczególnym aspektom analizowanego problemu badawczego?
- 3) Nieco kontrowersyjne dla recenzenta jest wyznaczanie do otrzymanych wyników indeksu zdrowia (p. 7.1 do 7.4) funkcji regresji. Jak sam doktorant wskazuje w tekście pracy, współczynniki dopasowania są na poziomie 0,6-0,8, co nie jest wartością uprawniającą do uznania ich jako dobrze dopasowanych. Przykładowo, w statystyce matematycznej przy doborze funkcji dystrybuanty do danych eksperymentalnych współczynnik dopasowania poniżej 0,95 praktycznie dyskwalifikuje użycie dopasowywanej funkcji do opisu danych eksperymentalnych. W przypadku analizowanych w niniejszej pracy danych „na pierwszy rzut oka” widać brak spójności danych, co wydaje się, powinno zmusić doktoranta do



większej uwagi w tym zakresie i z większą krytyką podejść do próby dopasowania odpowiednich prostych/krzywych do populacji. Proszę o komentarz w tym zakresie.

- 4) Proszę o doprecyzowanie czy wyniki z rozdz. 7 to indeksy zdrowia wyznaczone na podstawie pojedynczych wyników pomiarów przeprowadzonych na próbkach oleju pobranych z transformatorów?
- 5) Czy doktorant mógłby przedstawić, jaki jest udział procentowy, w danym przedziale wieku transformatorów, jednostek o danym stanie technicznym względem ogólnej liczby rozpatrywanych w danym przedziale jednostek i porównać te wyniki właśnie z punktu widzenia wieku eksploatacji. Takie podejście wskazałoby czy z czasem eksploatacji występuje faktyczna różnica we wzroście jednostek o miernym i ryzykownym stanie technicznym. Na niektórych grafikach widać bowiem, że nawet krótki czas eksploatacji może przynieść spore wartości indeksu zdrowia. Szczególnie transformatory przemysłowe charakteryzują się interesującym rozkładem wartości indeksu zdrowia. Proszę o komentarz wyników w tym zakresie.
- 6) Mimo wprowadzenia w rozdz. 5 podziału transformatorów ze względu na ich znaczenie dla systemu („krytyczność”), w rozdz. 7 brak jest uwzględnienia tego faktu w dyskusji. Czy doktorant nie sądzi, że taka dyskusja stanowiłaby wartość dodaną do rozważań zaprezentowanych przez autora?
- 7) Czy doktorant nie rozważał analizy pomiarów trendu zmian dla przypadków danej jednostki, dla której znana jest historia zmian parametrów w czasie eksploatacji? Być może możliwe stałoby się wyznaczenie zbiorczej linii trendu uwzględniającej trendy z serii jednostek podobnych?
- 8) Główną wadą przedstawionego w rozdz. 9 opisu jest brak jednoznacznego odniesienia do faktu, na jakiej podstawie wyznaczono w każdym przypadku (rysunki 9.1 do 9.7) prostą oznaczoną jako tzw. wartość symulowaną. Autor przytacza te proste i omawia ich zgodność bądź rozbieżność z wynikami rzeczywistymi, ale nie odnosi się w żadnym przypadku do źródła, na podstawie którego wyznaczono dana prostą. Proszę o komentarz.
- 9) W analizie przypadków z rozdz. 9 trudno też znaleźć odniesienie do rozważań z rozdz. 8, gdzie doktorant wskazywał na przyrosty wartości indeksu zdrowia, jako wskaźniki alarmowe i awaryjne, dlaczego?
- 10) W odniesieniu do danych z rozdz. 9 brakuje mi także informacji, jaka decyzja mogłaby zostać podjęta, gdyby w procesie diagnostycznym wykorzystano algorytm autorski indeksu zdrowia, czy pokryło by się to z rzeczywistymi reakcjami spółki zarządzającej danymi jednostkami?



- 11) Proszę o wypunktowanie najważniejszych wniosków z przeprowadzonych badań, głównie tych natury ilościowej. Rozdz. 10 przedstawia je w bardzo ogólnej postaci.
- 12) Czy doktorant weryfikował od strony ekonomicznej kwestie wykonywania częstszych badań oleju, aby skutecznie móc zaaplikować zaproponowany algorytm? Należy bowiem pamiętać, że niezawodność, która niejako jest w pracy rozpatrywana, jest zawsze kompromisem pomiędzy kosztami (w tym wypadku kolejnych pomiarów diagnostycznych), a uzyskanymi korzyściami w postaci zwiększenia niezawodności.
- 13) Chciałbym poprosić autora rozprawy o próbę wskazania sposobu aplikacji zaproponowanego rozwiązania w rzeczywistości diagnostycznej transformatorów. Czy autor uważa, że opracowane rozwiązanie można „zamknąć” w formę pewnego rodzaju produktu o komercyjnej naturze?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Mimo wielu uwag wskazanych powyżej recenzowaną rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Doktorant wykonał złożone analizy i wypracował rozwiązanie, które założył jako cel pracy. Dzięki przeprowadzonym rozważaniom i weryfikacji stworzonego algorytmu udowodnił postawione tezy.

Za najważniejsze osiągnięcia doktoranta w ramach przedłożonej do oceny pracy doktorskiej uznaję:

- oryginalne podejście do problemu wstępnej oceny stanu technicznego transformatora z izolacją papierowo-olejową w postaci opracowanego indeksu zdrowia mającego charakter liczbowego wskaźnika tego stanu;
- uwzględnienie w analizie dużej grupy transformatorów składającej się z 233 jednostek o różnorodnym przeznaczeniu i czasie eksploatacji;
- określenie możliwości wykorzystania w ocenie stanu technicznego transformatorów przyrostów indeksu zdrowia w określonych przedziałach czasowych wraz z propozycją warunków progowych dla progów stanu alarmowego i stanu awarii;
- przeprowadzenie weryfikacji algorytmu na wybranych z populacji jednostkach transformatorowych ze wskazaniem istotnych problemów w aspekcie aplikacji opracowanej metody;
- powiązanie otrzymanych wyników badań z zagadnieniami praktycznymi eksploatacji transformatorów z izolacją papierowo-olejową (czynnik aplikacyjny pracy doktorskiej).

Wobec powyższego uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Patryka Bohatyrewicza pt.: *„Zastosowanie indeksu zdrowia do wstępnej oceny stanu technicznego oraz analizy zmian*



starzeniowych transformatorów energetycznych” spełnia w stopniu wystarczającym wymagania stosownej ustawy i może być dopuszczona do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Pavel Hage". The signature is written in a cursive style with a large initial 'P' and a long horizontal stroke.

